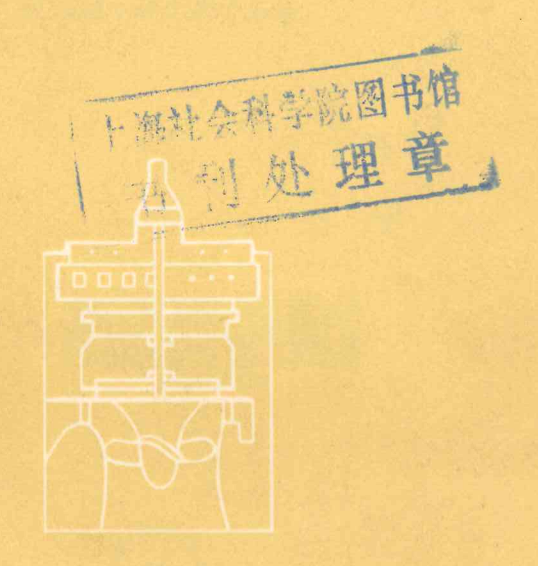
机械工业知识丛书

水力发电设备

哈尔滨大电机研究所编



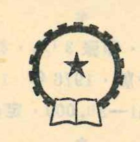
机械工业出版社

机 械 工 业 知 识 丛 书

水力发电设备

哈尔滨大电机研究所编





机 械 工 业 出 版 社

水力发电设备

哈尔滨大电机研究所编

(只限国内发行)

*

机械工业出版社出版(北京阜成門外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业許可証出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张 3 1/2·插页1·字数88千字

1975年11月北京第一版·1976年 1月北京第二次印刷

印数 10,001—20,000·定价0.32元

*

统一号号：15033·(内)663

出 版 说 明

在毛主席无产阶级革命路线指引下，我国机械工业欣欣向荣，蓬勃发展，形势很好。

“中国靠我们来建设，我们必须努力学习。”为了适应机械工业发展的需要，我们请有关单位编写了一套《机械工业知识丛书》，供机械行业的领导干部、管理人员和有关同志参考。

《水力发电设备》为本丛书之一。它扼要地介绍了水力发电设备的基本知识。分别介绍水力发电的生产过程，水轮发电机组(包括辅机)的结构组成、作用原理和各种水轮发电机组的性能。书中还介绍了关系到选用机组时所需要考虑的一些特性参数的含义和它们对机组性能的影响。

本丛书在编写过程中，各编写单位给予大力支持，做了大量的工作，我们表示衷心感谢。

由于我们水平有限，书中难免有缺点和错误，希望读者批评指正。

目　录

第一章　水力发电……………………………………………………1
一　概述……………………………………………………………1
二　水电站…………………………………………………………3
三　水电站的分类…………………………………………………5
四　水力发电设备…………………………………………………7
五　成套设计………………………………………………………11
第二章　水轮机及其辅助设备……………………………………12
一　水轮机的主要组成……………………………………………12
二　水轮机的分类…………………………………………………14
三　水轮机的主要特性和参数……………………………………23
四　水轮机结构……………………………………………………35
五　水轮机的汽蚀破坏、泥沙磨损和振动………………………48
六　水轮机的辅助设备……………………………………………51
第三章　水轮发电机………………………………………………54
一　水轮发电机的作用原理………………………………………54
二　水轮发电机的分类……………………………………………57
三　水轮发电机的结构……………………………………………62
四　水轮发电机的主要特性和参数………………………………75
第四章　自动化与调速器…………………………………………79
一　自动化…………………………………………………………79
二　水轮机调速器…………………………………………………82
三　油压设备………………………………………………………87
四　水轮发电机自动化元件………………………………………89
第五章　励磁及励磁调节装置……………………………………90
一　励磁及励磁调节装置的作用原理……………………………90
二　励磁方式的种类………………………………………………93
三　励磁自动调节装置的型式……………………………………97
附　录………………………………………………………………105
一　水轮发电机组原始设计资料…………………………………105
二　水轮机型号……………………………………………………107

第一章　水力发电

一、概　述

人们利用水力来发电，大约是在十九世纪八十年代。1878 年在法国巴黎附近建造的塞尔曼兹水电站是世界上最早的水电站。1882 年，设在美国的威斯康辛州的阿普尔顿水电站投入运行。这是一台容量仅能供 180 个 10 烛光照明电灯用的直流发电机。这些雏形电站的建立，揭开了近代大型水电站的序幕。

水力是一种获得廉价电力的来源。现在世界上已有总装机容量达 500 万千瓦的大型水电站，已投入运行的最大单机功率为 50 万千瓦，设计中最大的有 80 万千瓦水轮发电机组。

我国是世界上水力资源最丰富的国家之一，比苏联和美国的都多，因此积极开发水力资源，提供廉价电力，对促进工农业发展具有重大意义。我国的水力资源分布均匀，地形、地质条件优越，河流多峡谷，利于建造水电站。

虽然我国有这样丰富的水力资源，但在解放前，我国只有吉林的丰满、云南的石龙坝和四川的桃花溪等寥寥可数的几个水电站。

解放后，在中国共产党的英明领导下，在毛主席**独立自主、自力更生**方针的指引下，我国水电事业获得了迅速的发展。到1952年，先后试制成功了 800 千瓦和 3000 千瓦水轮发电机组，而较具规模的现代化水轮发电机组为我国自行设计制造的官厅水轮发电机组，其单机功率为 1 万千瓦。

继官厅水库之后，我国水电站的建设速度和水电设备的制造能力都不断得到提高。如新安江水电站只用了三年时间就建造成功。机组的单机功率从 1 万千瓦逐步增长，到 1959 年，新安江水电站 7.25 万千瓦水轮发电机制造成功，它标志着我国水电事

业已经达到了相当的水平。

无产阶级文化大革命以来，相继试制成功15万千瓦、22.5万千瓦和30万千瓦的成套水轮发电机组，这些机组均已先后发电。另外还有几十座大中型水电站的成套机组也已建成投产。

这许多水电站为工农业生产提供了廉价的电力。到1973年，全国水电装机容量比1965年增长了将近两倍。与此同时，水力发电设备的制造能力与技术水平也不断提高，机组的单机功率正向大容量发展。我国水轮机单机功率的增长情况见图1。

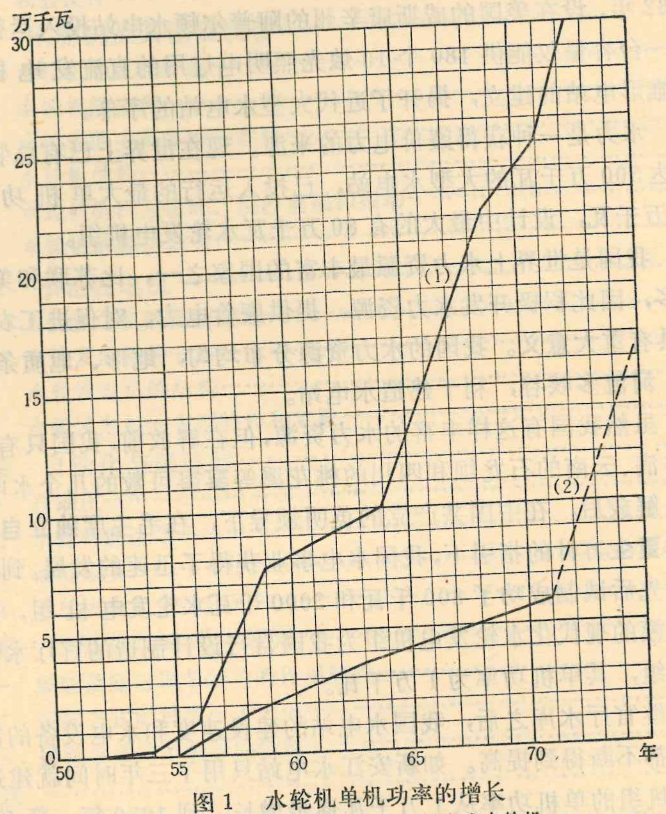


图1　水轮机单机功率的增长

（1）—混流式水轮机；（2）—轴流式水轮机

——已制造的；----正在设计的

在这里，特别值得提及的是，我国在建设大中型水电站的同时，在各地还自力更生地建设了五万多座农村小型水电站。到1973年，全国农村小型水电站的发电机装机容量比1965年增长了7倍左右。这些小型水电站促进了农业和地方工业的发展。

我国水电建设事业的迅速发展，是电力部门和机械制造部门广大职工坚决贯彻执行毛主席的无产阶级革命路线，根据"水电火电并举，在有水力资源的地区，多搞水电"的原则，全面规划，开展了大规模的水电建设的结果。

以水电与火电相比较，水电可节省大量的燃料，如新安江水电站每年可为国家节省约100万吨标准煤。水电站的发电成本低，厂用电少，管理人员少，如装机容量为三万千瓦的水电站，每班值班人员仅需3～4人。此外，水轮发电机组的起动、停机比较方便，因此水电站运转灵活、机动性高，便于电力系统中调节负荷（有功及无功），而且较为安全可靠，容易实现自动化操作等。水电站的缺点是水工建筑物的投资费用较高（一般水电站中机电设备的投资仅占整个电站投资的10～20%），建设周期较长，有时要淹没大片土地等。

由此可见，从整个国家或地区来讲，对于发展水电与火电，要统筹考虑，水火并举，因地制宜。要考虑到国民经济发展的需要和能源的分布情况。在水力资源丰富的地方多发展水电，在煤藏量（或其他矿物燃料）丰富的地方就多发展火电。

二、水电站

水电站是怎样利用水力来发电的呢？

如图2所示，在一条河流上选择一个适当的部位，修建一座大坝，把它的上游筑成一个可供蓄水的水库，提高上游的水位。然后从水库经水管将水流导入水轮机内，驱动发电机发电。图3就是属于这种类型的、由我国自行设计制造的新安江水电站的全貌。

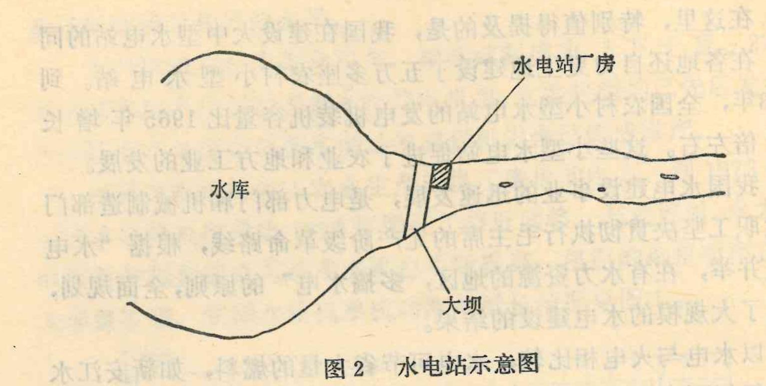


图2　水电站示意图

从图3上可以看到，在新安江的一个适当地位筑起了一道雄伟的混凝土拦河大坝，把新安江水截流蓄水。利用四周环山的自然地形，修起了一座宏伟的水库。使大坝前后的水位落差（即水头）达80来米。有了这个水头，就可使水库内的水通过引水管进入水轮机内，驱动水轮机的转轮，使水能转换成为机械能，然后又通过发电机，将机械能转换成电能，发出电来。

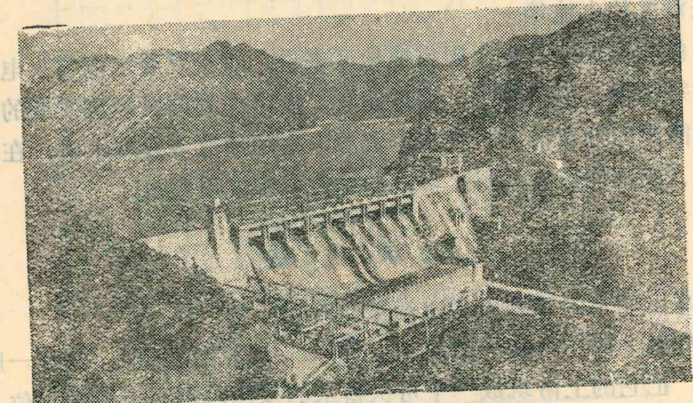


图3　新安江水电站全貌

从图3上还可以看到，大坝前方下侧便是新安江水电站的厂房，这里安装着水轮发电机组和其他机电设备。

由发电机发出来的电，经母线，通过低压断路器接至升压变压器，将电压由13.8千伏升高到220千伏，接入电网输电系统。新安江电站发出来的电就从这里开始经由高压开关站（见图3大坝左侧）馈入220千伏电网。这方面的具体技术内容在本丛书《输变电设备》一书中介绍。

水电站是整个水利建设工程的一环。在水利建设规划中应统筹考虑到综合利用。例如航行、灌溉和养鱼等。所以在建设大型水电站的过程中，要注意解决拦洪截流后的通航、漂木和各种鱼类的洄游、繁殖等问题。

三、水电站的分类

不同的水电站需要配备不同的水轮发电机组，所以在讲述水力发电设备之前，首先介绍一下水电站的种类。水电站可按不同方式分成若干种类型。

1. 按水头范围可分为

1）中、低水头水电站：水头在3～35米范围内的电站。

2）中、高水头水电站：水头在35～400米范围内的电站。

3）高水头水电站：一般水头在400米以上的电站。

2. 按进水方式可分为

1）引水式水电站：对水头高、流量小的河流，可采用引水式水电站。自河流适当地段取水引入，获得水位差（水头），用来发电，见图4。这种水电站的特点，简单地说，就是有多少水发多少电，逢到枯水就不发电。

2）堤坝式水电站：在河流适当地段筑坝蓄水获得落差（水头），国内一般大中型水电站均采取此种方式，如图5所示。这种水电站有较大的水库容积，可以调剂水量，对电站的运行操作较为灵活。

3）混合式水电站：这种水电站兼有引水式与堤坝式的特点，如图6。

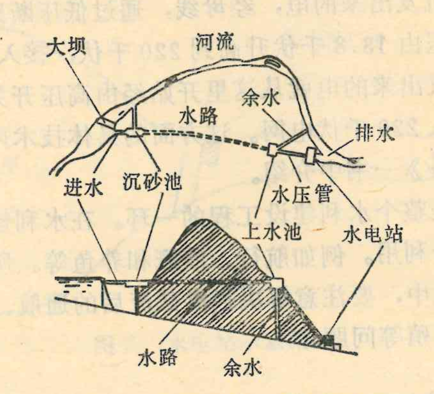


图 4　引水式水电站示意图

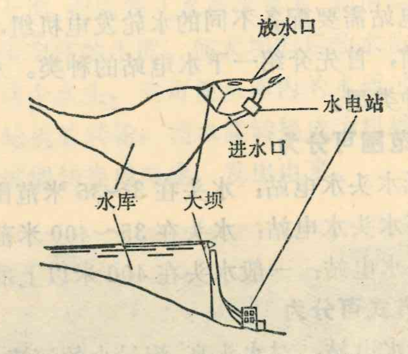


图 5　堤坝式水电站示意图

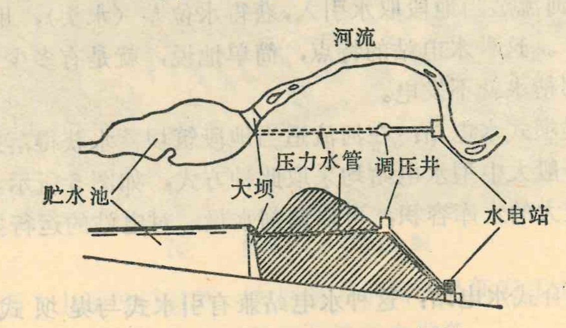


图 6　混合式水电站示意图

此外，还有一种蓄能式水电站，它是国外近年来兴建较多的一种电站。这种电站具有两种功能：一种是同常规水力发电方式一样，由水轮机驱动发电机发电；另一种功能是使发电机改作同步电动机运行，从电网中吸取电能，驱动水轮机把它当作水泵运行，把水从下游抽回到上游水库。这两种运行方式可使电力系统的调度更为灵活方便。当系统处于峰荷（电力系统中用电需要最多时）就利用上游水库所蓄的水来发电供给电力系统的需要。当电力系统中电力有富余的时候（例如深夜），则由系统供电，把水轮发电机组改成水泵机组运行，将下游的水抽回上游水库贮存。这种机组用的水轮机，可以是一机两用（水泵及水轮机）或是制成同轴的两机（一作水泵，一作水轮机）。这种机组用的发电机，也常常是制成一机二用（既是发电机又是电动机），分别采用两种不同的转速。

原子能电站和高参数的大容量水电站，适宜于承担系统中的基本负荷，这样就可以把调整高峰负荷的使命交由蓄能电站承担，互相配合，便于电力系统的调度，提高电力系统的经济性。所以近年来国外建造蓄能电站较多。

四、水力发电设备

水电站，主要是由水工建筑物和机电设备两大部分组成。水工建筑物包括大坝、堰堤、进水闸门、起重设备、引水管道及电站的厂房建筑等。这是投资的主要部分，而且建设的周期较长。机电设备主要包括水轮发电机组、一次回路输变电设备和二次回路控制设备等。所有这些设备在一个电站中的布置情况及其相互关系大致如图 7 所示。从这张图上还可以看到从水进来到电发出去的电力生产过程全貌。图中空白的箭头方向表示水流的流通途径，实心箭头方向表示电力的流通途径。

进一步把这些设备的配置用方块图来表示就成了图 8。图上用粗线箭头表示的为电力生产流程。

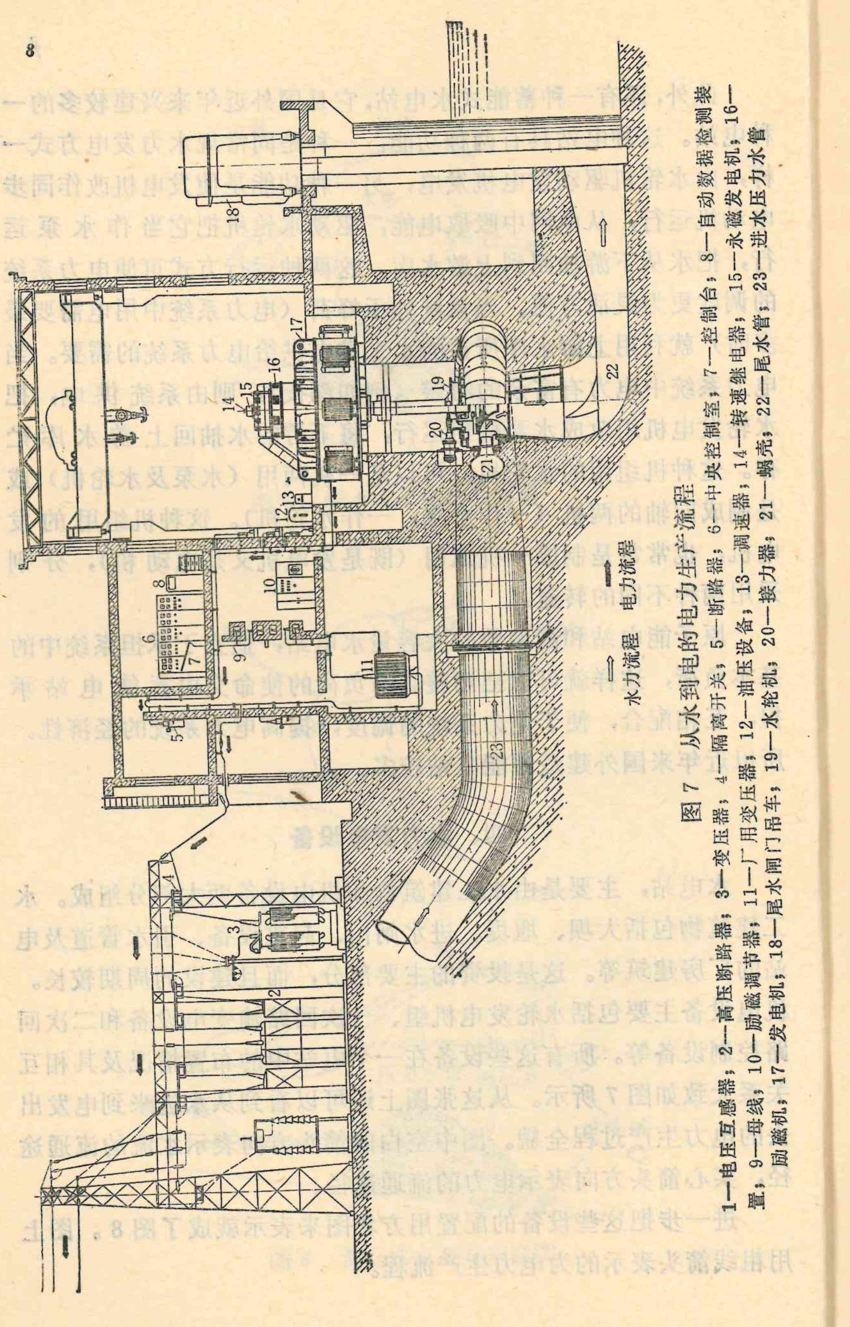


图 7 从水到电的电力生产流程

1—电压互感器；2—高压断路器；3—变压器；4—隔离开关；5—断路器；6—中央控制室；7—控制台；8—自动数据检测装置；9—母线；10—励磁调节器；11—厂用变压器；12—油压设备；13—调速器；14—转速继电器；15—永磁发电机；16—励磁机；17—发电机；18—尾水闸门吊车；19—水轮机；20—接力器；21—蜗壳；22—尾水管；23—进水压力水管

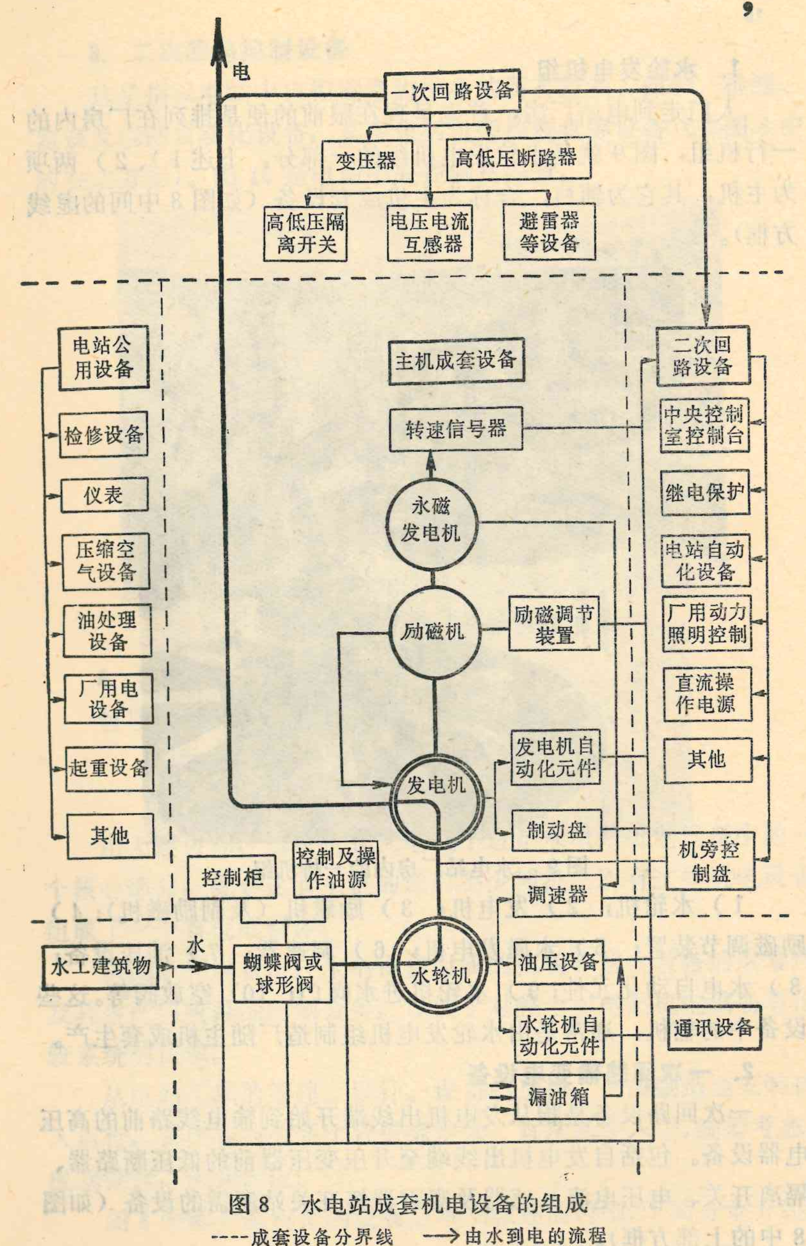


图 8 水电站成套机电设备的组成

----成套设备分界线 ——>由水到电的流程

1. 水轮发电机组

人们走到电站厂房，首先呈现在眼前的便是排列在厂房内的一行机组，图9就是水轮发电机组的一部分。下述1）、2）两项为主机，其它为辅机，合称为主机成套设备（如图8中间的虚线方框）。

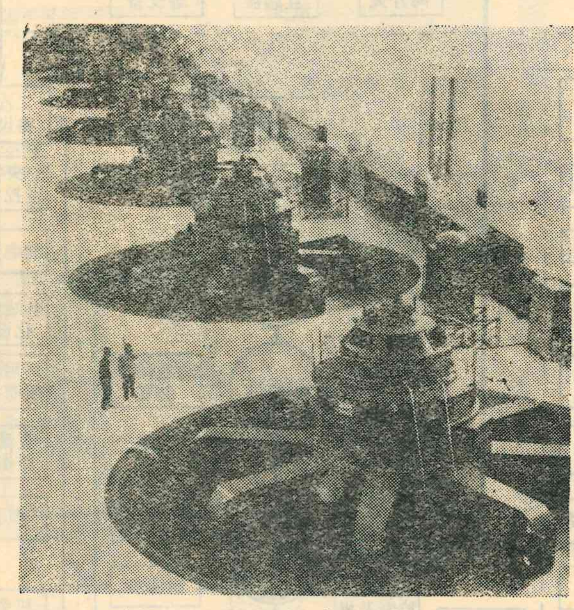


图9　水电站厂房内的一排机组

1）水轮机；2）发电机；3）励磁机（及副励磁机）；4）励磁调节装置；5）永磁发电机；6）调速器；7）油压设备；8）水电自动化元件；9）水轮机进水阀门；10）空放阀等。这些设备中的辅机，通常是由水轮发电机组制造厂随主机成套生产。

2. 一次回路输变电设备

一次回路设备是指从发电机出线端开始到输电线路前的高压电器设备。包括自发电机出线端至升压变压器前的低压断路器、隔离开关、电压电流互感器及避雷器等开关站所需的设备（如图8中的上部方框）。

3. 二次回路控制设备

这是指以电站中央控制室为中心的所有控制、保护、检测、监视及电站自动化设备，其中包括机旁控制盘等设备（如图8中的右边方框）。图10是电站中央控制室内景。

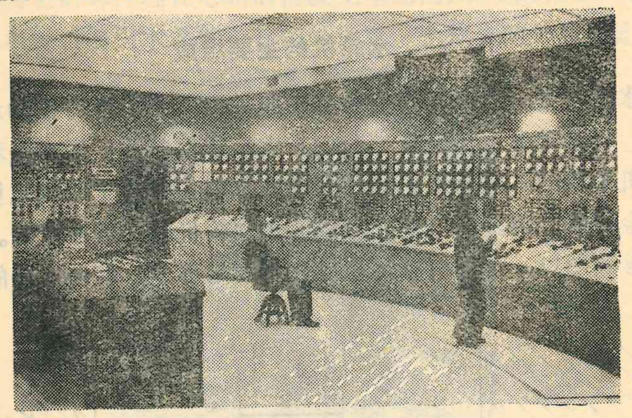


图10　电站的中央控制室

4. 其他

包括电讯设备和电站公用设备等（见图8）。

五、成套设计

由上述可知，水轮机和发电机不过是水电站机电设备中的一个核心部分，配合这套主机的还有不少辅机。所有这些机电设备组成了一个有机的整体。

从图8可以看出，水电设备组成的概貌和这些设备的成套性及其生产供应范围的划分等，以便于对整个水电站机电设备有比较系统的认识。

从电站工程的筹建、设计、设备的选择、生产制造至安装投入运行，其内容与关系比较错综复杂，宜从系统入手，统筹考虑，成套设计，成套供应。

图8中间方框包括的设备是本书叙述的范围，下面分章介绍。

第二章　水轮机及其辅助设备

一、水轮机的主要组成

水轮机是一种以水力为动力的原动机。利用水力推动水轮机旋转，再带动发电机发电。我们在大型水电站的厂房内是看不到水轮机全貌的，因为水轮机的大部分都埋在混凝土的机坑里或装置在金属机壳内。图11是一台混流式水轮机的一般布置图。

参照图11，水轮机有转动部分及固定部分。转动部分的主要

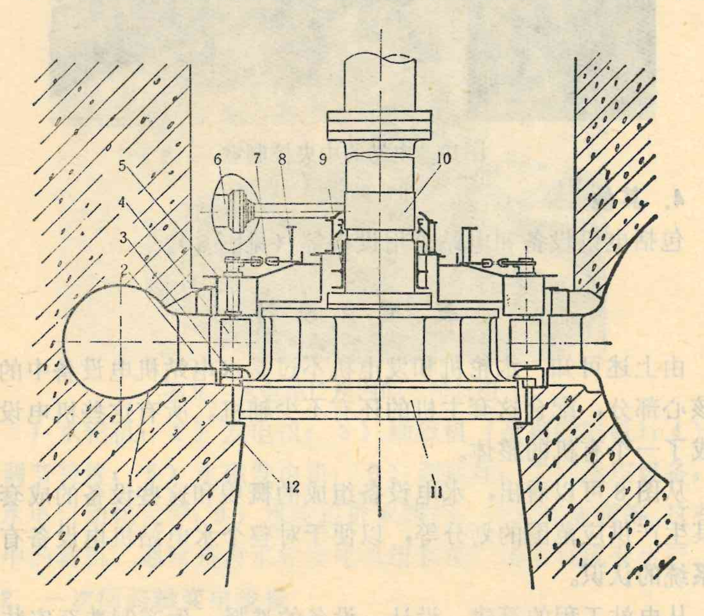


图11　混流式水轮机一般布置图

1—蜗壳；2—座环；3—底环；4—导叶；5—顶盖；6—接力器；7—传动机构；8—控制环；9—导轴承；10—主轴；11—转轮；12—尾水管

部件是转轮与主轴。转轮是水轮机的关键部件，它直接关系到水轮机的性能。图 12 是一个正在加工的混流式水轮机转轮。固定部分又包括埋入部分和导水机构等。埋入部分的主要部件是蜗壳与座环。因为它们都深埋在电站的混凝土基础内，所以称为埋入部分。蜗壳是水轮机的引水部件，它的外形象一个蜗牛的外壳（图 13）。

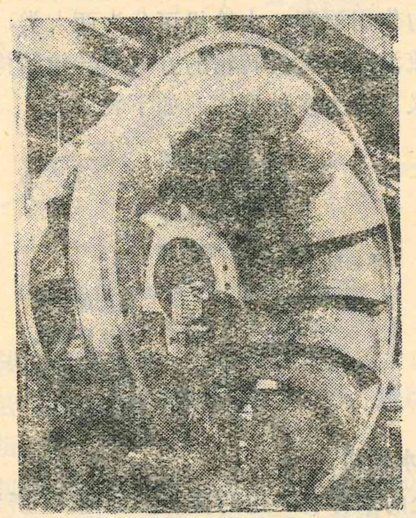


图12　正在加工中的混流式水轮机转轮

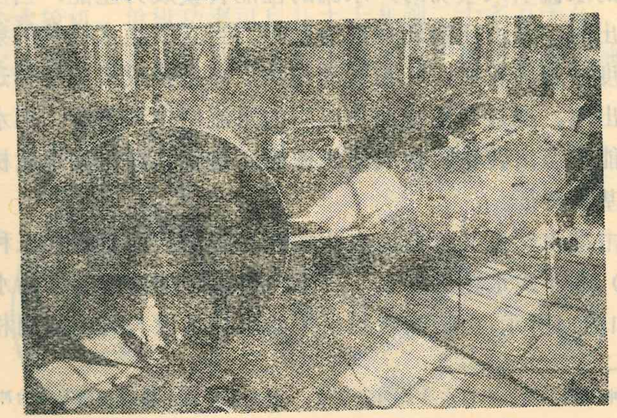
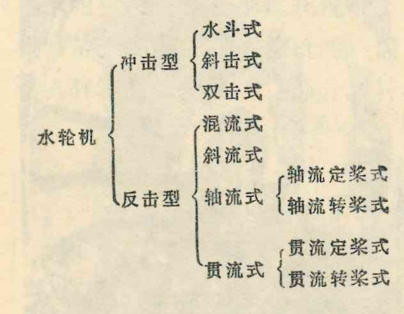


图13　水轮机蜗壳

座环则是承受整个水轮发电机组重量的支承部件。导水机构部分所包括的部件较多，主要有顶盖、底环、导叶以及控制机构等。

二、水轮机的分类

水轮机有很多种，上节讲的是其中主要的一种，称为混流式水轮机。按水力作用原理，水轮机可分为两大类，即冲击型与反击型。根据水流流经水轮机转轮的方向及转轮结构上的特征，这两大类水轮机又可分为多种型式，如下表所列。



1. 冲击型水轮机

贮存在高处的水含有一定的位能。如图 14 所示，把具有一定位能的水流引入喷嘴时，水流的位能转换成为压能，当水流从喷嘴射出时，又由压能转换成为动能。当这股呈水柱状的射流以一定速度冲击转轮时，转轮转动作功，即转换成机械能传送给发电机发出电。通过转轮作完功以后的水流便排到下游。把水能全部以动能形态由转轮转换成为机械能，这就是冲击型水轮机水力作用的基本特征。

冲击型水轮机又可分为水斗式[●]、斜击式和双击式三种。

1）水斗式水轮机　水斗式水轮机是早期发展起来的水轮机之一。如图14所示，由喷嘴喷射出来的水柱是以与转轮圆周相切方

● 冲击型水轮机中以水斗式为最常用，因此水斗式水轮机习惯上称为冲击式水轮机。这里是按水轮机系列型谱分类的。

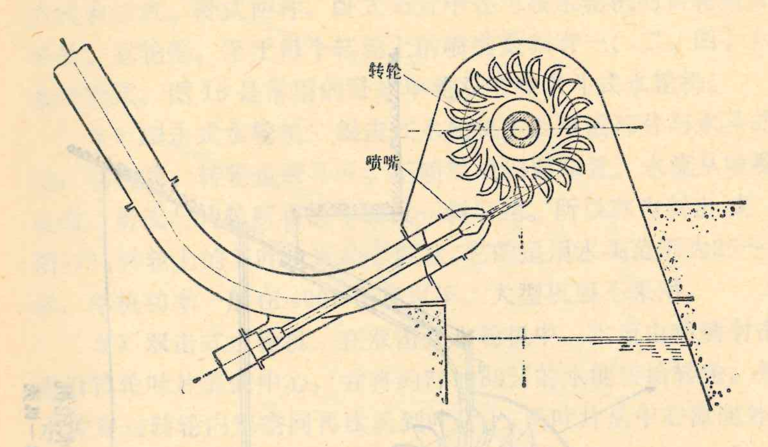


图14　冲击型水轮机示意图

向冲击到装在转轮四周的水斗上，使转轮旋转。由于在转轮外缘均匀地分布着若干呈瓢状的斗叶（如图 15），所以称这种水轮机为水斗式水轮机。

该类水轮机适用于从 100 米左右直至近 2000 米的中、高水头水电站，使用范围较宽。目前，它是唯一适用于 700 米以上的高水头的水轮机。单机功率可自几十千瓦到二十多万千瓦。

水斗式水轮机还可分成多种不同型式。如按水轮机轴的布置

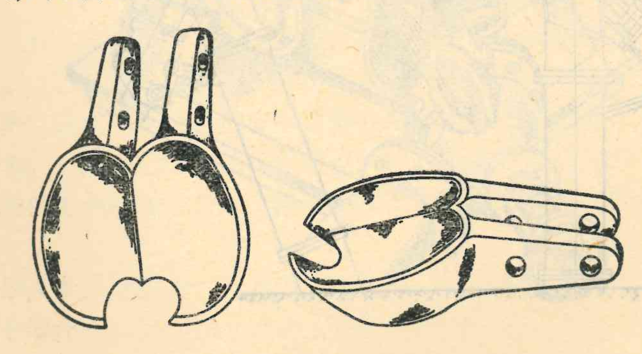


图15　水斗式水轮机转轮的斗叶

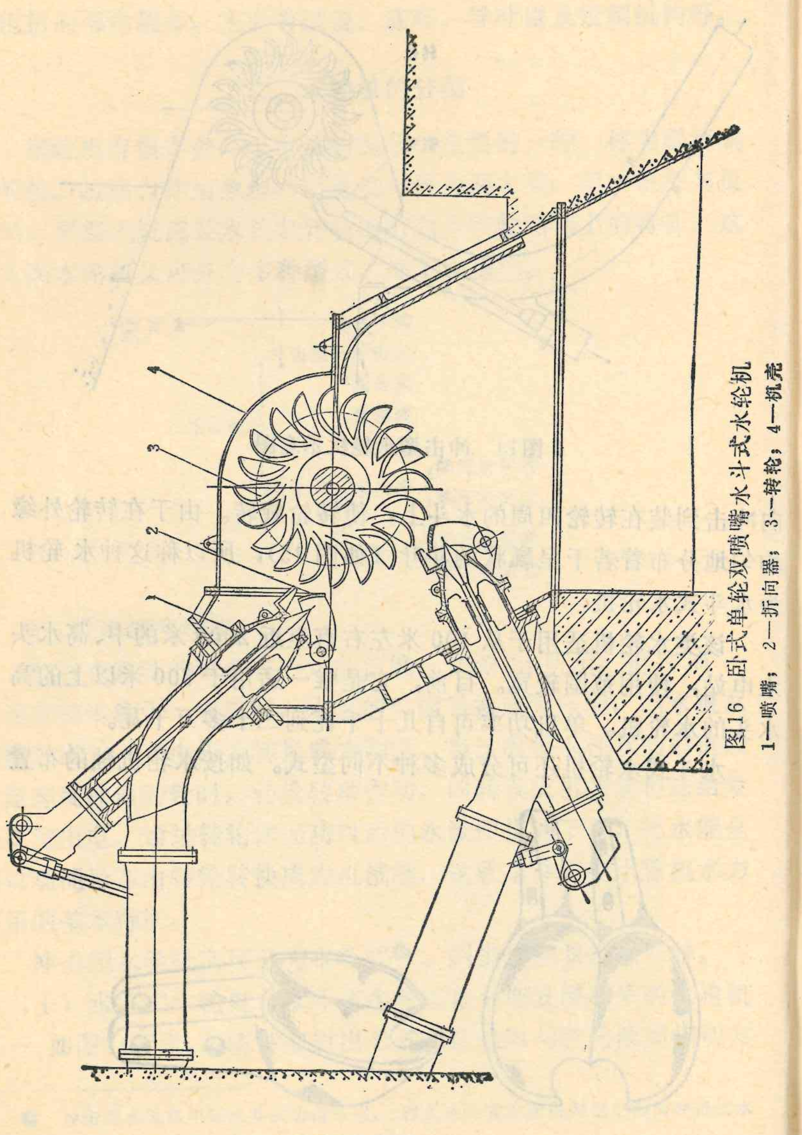


图16 卧式单轮双喷嘴水斗式水轮机
1—喷嘴，2—折向器，3—转轮，4—机壳

方式有立式、卧式两种。卧式布置中还可按水轮机的转轮数分成单轮、双轮等。至于每个转轮上的喷嘴数则有一、二、四、六等多种型式。图 16 是常用的卧式单轮双喷嘴水斗式水轮机。

2）斜击式水轮机　斜击式水轮机主要组成部分与水斗式类似，有喷嘴、转轮也带斗叶。但喷嘴成斜向布置。水流从喷嘴射出时，射流与转轮所在的平面成一斜射角。所以称为斜击式（如图17）。转轮上的斗叶也近似于瓢状。它的适用水头范围为25～300米，单机功率一般在 4000 千瓦以下。大型机组不采用。

3）双击式水轮机　在双击式水轮机中，水流由喷嘴射击，先沿转轮叶片流向中心，并将约70～80％的水能传给转轮。然后水流穿过转轮内部空间再次流到叶片上，沿叶片从中心流向外缘，

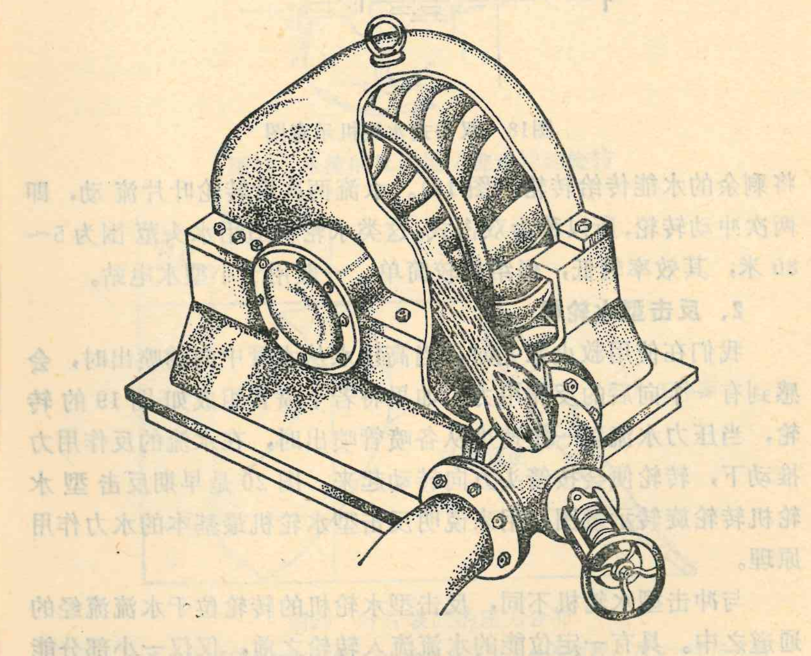


图17　斜击式水轮机

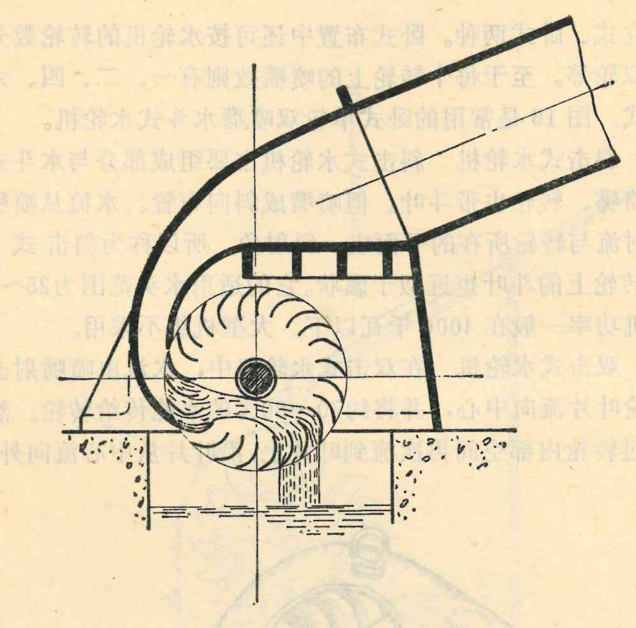


图18　双击式水轮机示意图

将剩余的水能传给转轮（图 18）。水流两次沿转轮叶片流动，即两次冲动转轮，所以称为双击式。这类水轮机适用水头范围为5～80米，其效率较低，但结构较简单，一般用于小型水电站。

2、反击型水轮机

我们在使用救火水龙时，当高压水从水管中向前喷出时，会感到有一个向后的反作用力。如果将若干喷管组成如图 19 的转轮，当压力水流以一定速度从各喷管喷出时，在水流的反作用力推动下，转轮便会按箭头方向转动起来。图 20 是早期反击型水轮机转轮旋转示意图，用来说明反击型水轮机最基本的水力作用原理。

与冲击型水轮机不同，反击型水轮机的转轮位于水流流经的通道之中。具有一定位能的水流流入转轮之前，仅仅一小部分能量转换为动能，而大部分转换为压能。反击型水轮机转轮叶片形

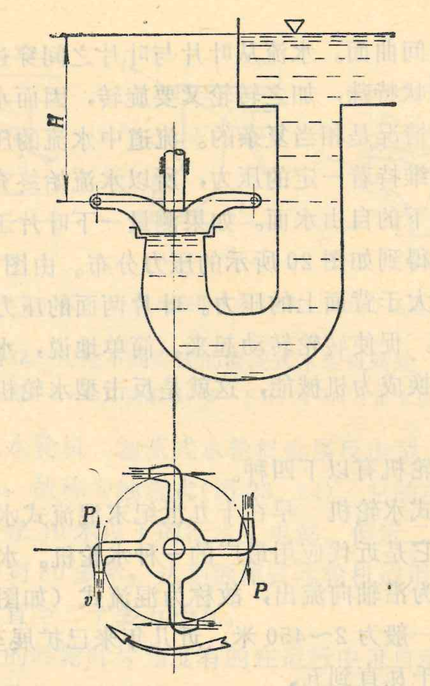


图19　水流的反作用力推动转轮旋转

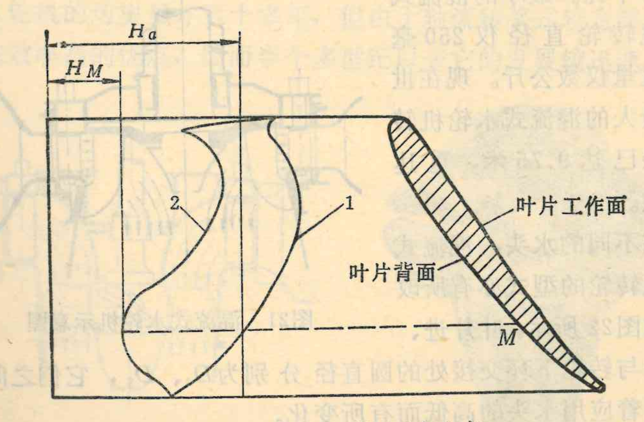


图20　叶片表面的压力分布

1—叶片工作面压力分布曲线；2—叶片背面压力分布曲线；H_M—叶片背面M点的压力（叶片背面最低压力）；H_a—大气压

状复杂，呈空间曲面。水流从叶片与叶片之间穿过，称为过流通道。流道的形状特殊，加之转轮又要旋转，因而水流进入转轮后，它的流动情况是相当复杂的。流道中水流的压力分布尽管较复杂，但是它维持着一定的压力，所以水流始终充满了流道，不会出现大气压下的自由水面。如果测量一下叶片工作面及背面上的压力，可以得到如图 20 所示的压力分布。由图可见，叶片工作面上的压力大于背面上的压力。叶片两面的压力差便是构成转动力矩的条件，促使转轮转动起来。简单地说，水能主要以压能形态由转轮转换成为机械能，这就是反击型水轮机水力作用的基本特征。

反击型水轮机有以下四种。

1）混流式水轮机　早在十九世纪末混流式水轮机就已发展得较为完善，它是近代应用最广的一种水轮机。水流先沿辐向流进转轮后，转为沿轴向流出，故称为混流式（如图 21）。它的适用水头的范围一般为 2～450 米。近几年来已扩展至 600 米。单机功率则自几十千瓦直到五、六十万千瓦。最小的混流式水轮机转轮直径仅 250 毫米，重量仅数公斤。现在世界上最大的混流式水轮机转轮直径已达 9.75 米，重达 566 吨。

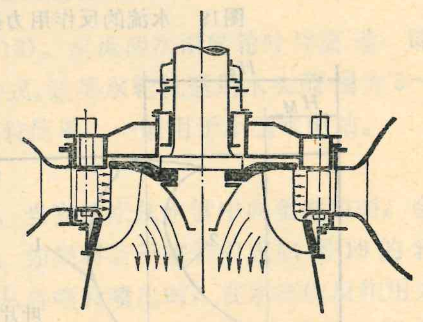


图21　混流式水轮机示意图

在不同的水头，混流式水轮机转轮的型式亦有所改变，如图22 所示，叶片进、出水边与转轮下环交接处的圆直径分别为 D_1、D_2，它们之间的关系随着应用水头的高低而有所变化。

目前大、中型混流式水轮机多为立式布置，小型则常采用卧式布置。

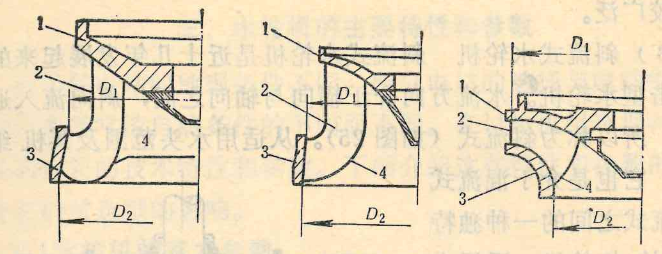
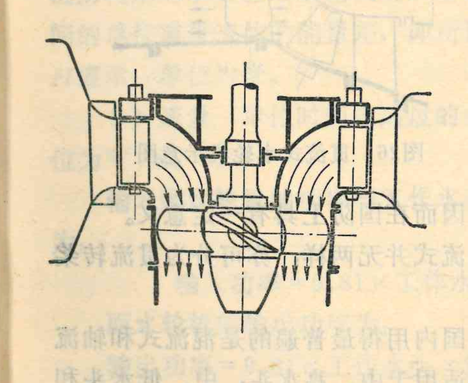


图22　几种不同型式的混流式水轮机转轮

1—上冠；2—叶片进水边；3—下环；4—叶片出水边

2）轴流式水轮机　轴流式水轮机也属反击型　由于水流进出转轮都是轴向，故称为轴流式（图 23、24）。它的应用也很广，特别适用于水头在 40 米以下的低水头电站。但近二十年来它的使用水头已扩展到 80 多米，达到混流式水轮机适用的范围，单机功率自数千瓦直至二十多万千瓦。

这类水轮机的转轮叶片角度有的在运行中可自动调节，有的不可调节。前者称为轴流转桨式，后者称为轴流定桨式。轴流转桨式水轮机的历史虽才五十多年，但由于轴流转桨式较定桨式具有平均效率高的优点，因而半个多世纪以来它的发展较迅速，应



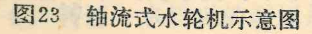


图23　轴流式水轮机示意图



图24　轴流式水轮机转轮

用亦较广泛。

3）斜流式水轮机　斜流式水轮机是近十几年发展起来的新型反击型水轮机。水流方向介于辐向与轴向之间，斜向流入通过转轮，所以称为斜流式（如图25）。从适用水头范围及其机组性能看，它也是介于混流式和轴流式之间的一种独特类型的水轮机。适用水头范围40～200米。目前最大的斜流式水轮机单机功率已达八万多千瓦。

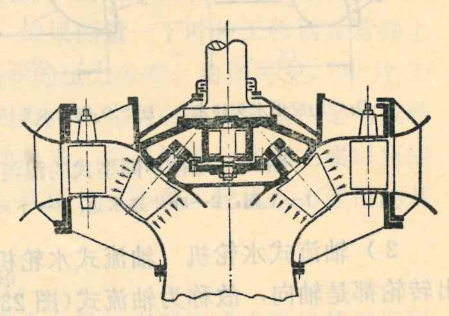


图25　斜流式水轮机示意图

4）贯流式水轮机　通过贯流式水轮机的水流几乎是沿轴向直贯到底（图26）。整个水轮机采取卧式布置，个别有斜轴布置。它是在轴流式水轮机基础上发展起来的，至今才不过三十多年的历史。贯流式是一种适于低水头（2～30米）的水轮机，多用于小型水电站，特别适用于潮汐电站。由于它结构紧凑，所需空间小，适于装置在地下或坝内，因而在国防上具有一定意义。

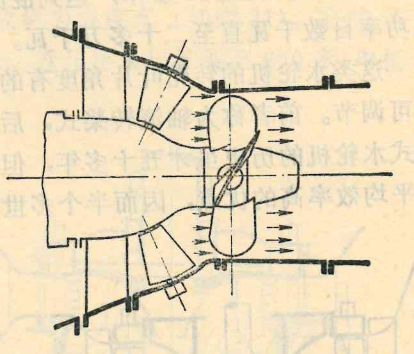


图26　贯流式水轮机示意图

贯流式水轮机的转轮和轴流式并无两样，亦可分为贯流转桨式和贯流定桨式两种。

水轮机的品种虽然很多，国内用得最普遍的是混流式和轴流式两种，其次是水斗式。分别适用于中、高水头，中、低水头和高水头。

三、水轮机的主要特性和参数

由于各电站的地理条件不同，所以电站的选择与电站中所用机组的选择常随自然条件的不同而不同。在讨论机组选型时，就要谈到有关的技术特性和参数。下面介绍这些特性和参数的含义以及它们对选型的影响。

1. 水轮机的基本参数

1）水轮机的功率和效率　水轮机在单位时间内从主轴上输出的功叫做水轮机的功率，一般用N表示，单位为千瓦。

水流中所含有的能量并不是全部都转换成为机械能。往往由于阻力、摩擦、漏水等而使部分水能消耗掉。效率就是水轮机的输出和输入之间的能量比，用百分比表示。现代大型水轮机的效率最高可达94%。

2）水头　在流体力学中水头的意义是：单位重量流体所具有的能量。

电站上、下游的水位差称为电站的装置水头见图27，图中用H_z表示。这个水头并不能全部为水轮机所利用，一部分被电站水工建筑物（如引水渠道，管道等）的阻力所消耗。真正为水轮机所利用的水头应是水轮机进口断面$A-A$和尾水渠断面$B-B$之间的单位重量流体的能量差，即所谓水轮机的工作水头，通常用H表示，单位为米。

3）流量　单位时间内通过的水量称为流量，用Q表示，单位为米³/秒。

输入到水轮机的功率与工作水头及通过水轮机的流量的关系为：

$$输入功率 = 9.81 \times 工作水头 \times 流量（千瓦）$$

而水轮机的输出功率为：

$$输出功率 = 9.81 \times 工作水头 \times 流量 \times 水轮机效率（千瓦）$$

4）转速　水轮机的转速用n表示，单位为转/分。因近代水

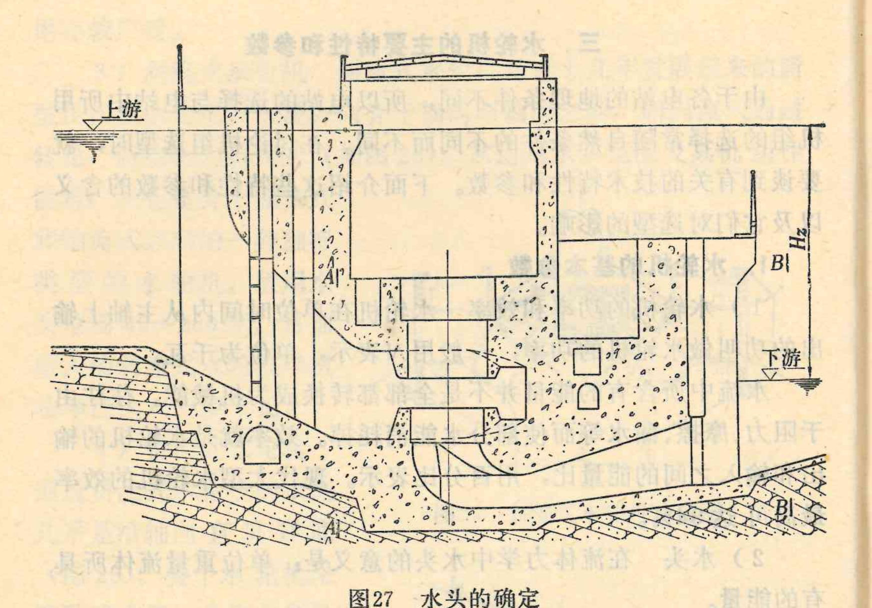


图27　水头的确定

轮机通常都是和水轮发电机直接连接的，所以水轮机的额定转速必须符合发电机同步转速的要求。我国电网采用的标准频率为 $f=50$赫芝，当发电机的磁极对数为P时，它的同步转速为：

$$n=\frac{60f}{P}=\frac{3000}{P}\ (\text{转/分})$$

根据水轮发电机磁极对数不同，可得到一系列同步转速值，机组的额定转速就从这些同步转速中选取。例如一台水轮发电机有 16 对磁极，则它的转速为 187.5 转/分。

5）转轮直径　转轮直径是水轮机中最重要的几何特征尺寸，通常用 D_1 表示。水斗式、混流式、斜流式和轴流式水轮机转轮标称直径 D_1 分别如图 28 中（1）、（2）、（3）、（4）所示。

2. 水轮机的相似准则

对一台水轮机除必须保证结构、工艺、材料、强度、刚度等各方面的合理性外，更主要的是必须保证水力性能的合理。所以

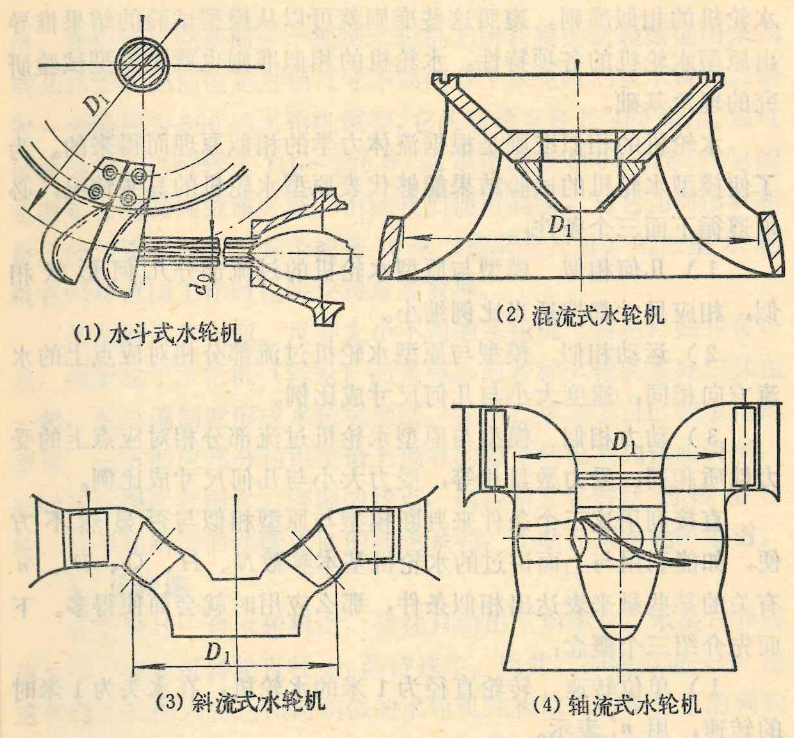


图28　各类水轮机转轮的标称直径 D_1

水轮机的设计包括水力设计与结构设计两部分。水轮机水力设计的任务和目的便是要发挥水能的最大作用。由于水在水轮机中的流动情况十分复杂，单靠理论计算是不能圆满地完成水力设计任务的。另一方面现代水轮机的尺寸已做得很大，加上电站条件的限制，要通过电站现场测试来全面地确定水轮机的水力性能，也较难以做到。所以一般都采用从模型试验研究入手并与理论计算相结合的方法。水轮机的模型试验就是水力设计的科学依据。但是模型并不是原型水轮机，因此必须找出模型与原型水轮机相互关系的规律性。通过科学实验得知，模型水轮机与原型水轮机之间有着许多相似性。把这些共同点归纳起来，找出其中规律便得到

水轮机的相似准则。遵照这些准则就可以从模型试验的结果推导出原型水轮机的各项特性。水轮机的相似准则也就是模型试验研究的理论基础。

水轮机的相似准则是根据流体力学的相似原理而得来的。为了使模型水轮机的试验结果能够代表原型水轮机的真实情况，必须遵循下面三个条件：

1）几何相似　模型与原型水轮机的过流部分几何形状相似，相应尺寸都按适当比例缩小。

2）运动相似　模型与原型水轮机过流部分相对应点上的水流方向相同，速度大小与几何尺寸成比例。

3）动力相似　模型与原型水轮机过流部分相对应点上的受力性质相同，受力数量相等，受力大小与几何尺寸成比例。

直接利用这三个条件来判断模型与原型相似与否显然不方便，如能利用与上面讲过的水轮机基本参数N、H、Q、D_1、n有关的某些量来表达出相似条件，那么应用时就会简便得多。下面先介绍三个概念：

1）单位转速　转轮直径为1米的水轮机，在水头为1米时的转速，用n_1'表示。

2）单位流量　转轮直径为1米的水轮机，在水头为1米时通过转轮的流量，用Q_1'表示。

3）单位功率　转轮直径为1米的水轮机，在水头为1米时所发出的功率，用N_1'表示。

它们分别与水轮机基本参数N、H、Q、D_1、n之间存在着一定的关系[1]。

在满足上述三个相似条件时，模型水轮机与原型水轮机的单位转速、单位流量、单位功率分别等于某个常数。根据这个规

[1] $n_1'=\frac{nD_1}{\sqrt{H}}$;　$Q_1'=\frac{Q}{D_1^2\sqrt{H}}$;　$N_1'=\frac{N}{D_1^2H^{\frac{3}{2}}}$

律，我们可以把从同一个模型水轮机上所获得的试验数据用来判别几何形状相似但是直径尺寸不同的各个水轮机的技术特性。例如一个编号为560的水轮机模型，它的转轮直径是460毫米。通过试验得知，单位转速110～150转/分，单位流量600～1250升/秒的范围是它的最高效率区域。由此我们便可判断，与它几何形状相似，但转轮直径为5.5米或是10米（或其它尺寸）的原型水轮机在同样范围工作时也将获得最高效率。

把几何形状相似、尺寸大小不同的水轮机（转轮）归并在一起，就形成了水轮机（转轮）的系列。把各种水轮机系列归并在一起，经过编制就形成水轮机型谱。我国已建立了自己的水轮机型谱。一方面应充分利用型谱上现有的模型转轮系列试验资料，同时还应根据我国水力资源的特点，试验研究各种新的模型转轮，以得到新型的性能优良的转轮系列，不断充实水轮机型谱。

3. 比转速

开始设计一台水轮机时，往往只给出了功率N，水头H和转速n等。水轮机转轮直径D_1尚待选定。因此，如能再进一步用这些已知数据来表达几何相似的水轮机在相似工作条件下的判别数，则会更便利。它就是水轮机的比转速，用n_s[1]来表示。几何相似的水轮机在相似工作条件下，它们的比转速相等。对同一系列水轮机我们如果只计效率最高时的比转速值，那么同一系列内的水轮机就只具有一个比转速值。所以比转速成了表征该系列水轮机的一个重要参数。再明确点讲，在有效水头为1米，发出功率为1马力时，具有某个尺寸的水轮机的转速值就是该水轮机的比转速。如编号为220的水轮机，它的比转速为221。亦即有效水头为1米，具有某个尺寸的该水轮机发出功率为1马力时，其转速就是221转/分。

[1] $n_s=\frac{n\sqrt{N}}{H^{\frac{5}{4}}}$

图 29 表示了当水头为 1 米，发出的功率为 1 马力时，各种比转速水轮机的转轮直径值。从图中可见，转轮的尺寸随着比转速的增高而减小。例如图中(2)、(3)同是混流式转轮，同样在水头为 1 米时发出功率 1 马力。比转速为 106 的转轮直径为 612 毫米，比转速为 221 的转轮直径就减为 314 毫米，几乎缩小一半。所以现在水轮机发展的一个方面就是倾向于采取高比转速的转轮。

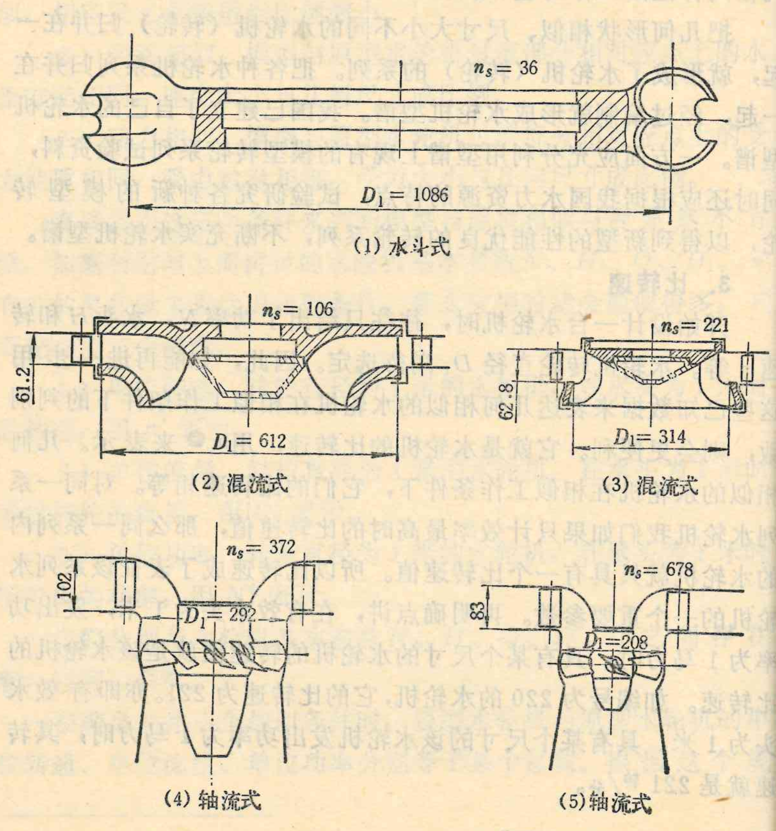


图29 当$H = 1$米，$N = 1$马力时
各种比转速水轮机的转轮尺寸

4. 水轮机的汽蚀特性和吸出高度

汽蚀是水轮机的一个重要特性，是一个较复杂的问题。本节只介绍一般的汽蚀现象及水轮机汽蚀特性的有关问题。

1）汽蚀现象和汽蚀破坏　通常当水温升到 100°C，水就开始沸腾汽化。可是在高山上，不容易煮熟饭，因为高山上气压较低，烧水时温度还不到 100°C水就沸腾汽化。这是水的一个物理特性。相应于某一压力时就有一个相对应的使水沸腾汽化的温度值。这个压力称为在该沸腾温度下水的饱和蒸汽压力。

一般水电站水库的平均水温为 20°C左右，此时水的饱和蒸汽压力相当于 0.24 米水柱。如果水轮机中某处水流压力达到 0.24 米水柱，那么此处的水就会汽化，放出大量汽泡。汽泡随着流水被带到高压区时，汽泡内的水蒸汽将因压力增高重又凝结为水。同时汽泡周围的水在高压作用下，以高速向汽泡中心撞击，致使汽泡破裂或使水流互相碰撞。在汽泡产生和再凝结过程中所引起的一系列物理现象，就称之为汽蚀现象。若在金属表面附近发生汽蚀现象，上述的碰撞便会直接作用于金属表面，造成金属表面呈海绵状的机械破坏。这种现象称为汽蚀破坏。迄今为止，还没有对产生汽蚀的机理及其防止方法找出完善的解释和对策。

2）汽蚀系数和吸出高度　由于存在汽蚀破坏，因而如何防止发生汽蚀就成为人们研究的重要课题。回过来再看水轮机转轮叶片上的压力分布情况。前面图 20 表示转轮叶片两表面上的压力分布。叶片背面M点的压力最低。若最低压力值H_M低于饱和蒸汽压力，则水流在通过转轮流经此处时就一定汽化，而引起汽蚀，所以叶片背面的M点就成为人们研究的焦点。如能控制M点的压力值H_M不低于饱和蒸汽压力$H_{汽}$，那么就有可能控制汽蚀。

在继续谈控制汽蚀问题之前，先介绍两个名词。一个是汽蚀系数，通常用σ来表示。它是表示水轮机转轮汽蚀性能的一个参数，由模型试验得出。另一个是吸出高度，通常用H_s来表示。一

般来说，它是水轮机转轮中心与电站下游水面之间的高度差。如图 2-22 所示，当水轮机转轮中心的安装高度高出下游水面时，H_s 为正。反之，低于下游水面时，H_s 为负。

分析转轮叶片背面 M 点的压力状况，关系到以下四方面因素：

（1）汽蚀系数，用 σ 表示；

（2）吸出高度，用 H_s 表示；

（3）工作水头，用 H 表示；

（4）水轮机转轮安装的海拔标高，用▽表示。

经分析，要控制 M 点不发生汽蚀的条件是：

$$H_s \leqslant 10.0 - \frac{\nabla}{900} - \sigma H$$

分析上式及图 30，当水轮机的汽蚀系数 σ 越大，吸出高度 H 就越小，装机就越深，厂房开挖量就越大，电站造价就越高。反之，σ 越小，H_s 越大，开挖量就越小，造价就越低。关于 H

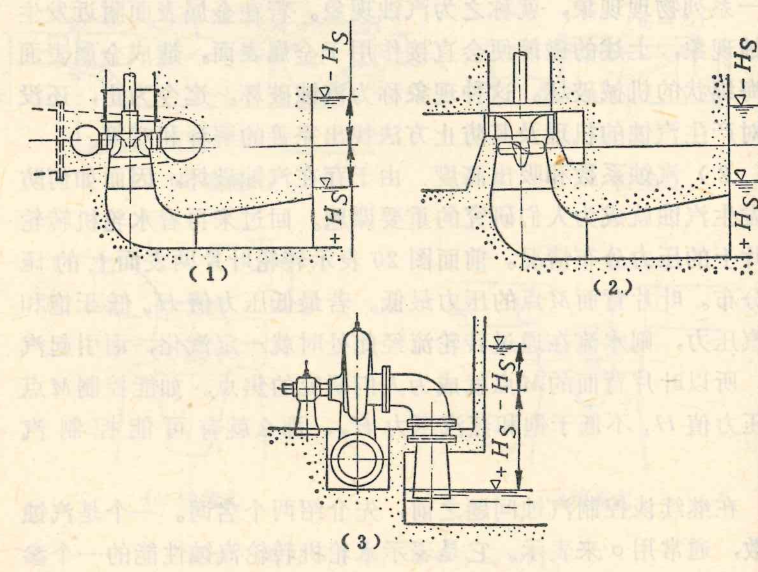


图30　各类水轮机吸出高度 H_S 的起算位置

的大小与减小水轮机汽蚀系数 σ 的意义由此可见。

以上是与汽蚀有关的一些基本概念，关于水轮机中汽蚀发生的部位及其后果等将在后面说明。

5. 水轮机模型综合特性曲线

前面已经谈到模型试验为设计水轮机提供了数据。把从模型试验中所取得的数据汇总起来绘成图表就得到了如图 31 那样的水轮机模型综合特性曲线。

根据水轮机相似准则，同一系列的水轮机在相似工作条件下，单位转速 n_1' 和单位流量 Q_1' 都是常数。反过来说，一定的 n_1' 值和 Q_1' 值代表着该系列水轮机运行的工作条件，一般称为运行工况。模型综合特性曲线就是画在以 n_1'、Q_1' 为纵、横座标轴的图上。每一对 n_1' 和 Q_1' 值代表着水轮机的一个运行工况。因此，某系列水轮机的运行工况范围究竟多大？水轮机在任一工况下工作时，它的效率值、汽蚀系数值究竟等于多少？这些问题都可从模型综合特性曲线上得到解答。

图 31 是混流式水轮机模型综合特性曲线。

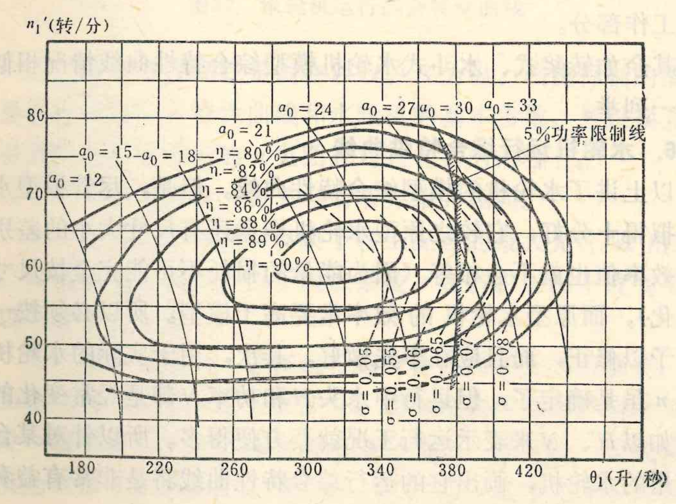


图31　混流式水轮机模型综合特性曲线

在这种综合特性曲线上可以见到四种曲线：

1）等开度曲线　图31中标有a_0的一组曲线称为等开度曲
线，它表示了在任一水轮机导叶开度a_0下，水轮机的各运行工
况点。

2）等效率曲线　图31中标有η的状如蛋形的一组曲线称
为等效率曲线，它在综合特性曲线上最为显著。它表示出各工况
点的效率值，在同一圈曲线上的各工况点的效率值都是相等的。
最里边一圈曲线代表该系列水轮机所可能达到的最高效率。从图
31中可见，最高效率为90%。

3）等汽蚀系数曲线　图31中标有σ的一组曲线称为等汽
蚀系数曲线。在同一条曲线上的各工况点其汽蚀系数值都相等。

4）5%功率限制线　对于一个确定的单位转速值，按水轮
机所能发出的最大功率的百分之五留出余量，得到一个限制工况
点。对于一系列单位转速值，就得到一系列限制工况点，从而形
成一条曲线，即称为5%功率限制线。它将综合特性曲线分为两
部分。水轮机的运行被限制在曲线的左部，称为工作部分。右部
为非工作部分。

其余如转桨式、水斗式水轮机模型综合特性曲线情况相似，
不一一列举。

6. 水轮机运行综合特性曲线

以上讲了水轮机的模型综合特性曲线。但是，尽管模型水轮
机模拟得十分好，它较之原型水轮机毕竟还有尺寸大小的差别。
它的效率值也就不会相等（因为能量的损耗不可能完全按尺寸
例变化），而原型水轮机的效率常要高于模型。所以必须按一
方法予以修正，而且应在事先做好。其次，用于实际的水轮机
转速n虽是确定了，但运行中水头H和功率N却是经常变化的。
此时如以H、N来表示运行工况就要方便得多。所以针对某台
际应用的水轮机，画出它的运行综合特性曲线将是非常有益和
要的。

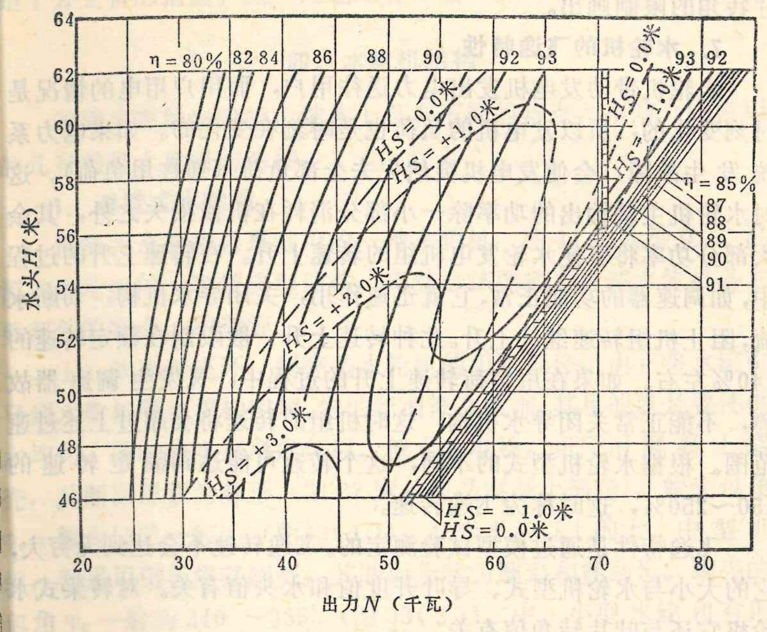


图32　水轮机运行综合特性曲线

运行综合特性曲线是画在以H、N为纵、横座标轴的图上，它是根据模型综合特性曲线和水轮机的基本参数，经过换算并予以必要的修正而作出的（见图32）。它包括的内容有：

1）等效率曲线　含义与前节介绍的相同。

2）等吸出高度线　反映了各工况点的最大允许吸出高度值。对混流式水轮机，由于汽蚀系数σ在各种工况下改变不大，所以有时不予绘出。

3）功率限制线　它将运行综合特性曲线分为两部分，左部为工作部分，右部为非工作部分。功率限制线本身分为两段：垂直段一般根据发电机的额定功率限制画出。斜线段，对混流式水轮机是根据5%功率限制线画出；对转桨式水轮机则根据最大允许吸出高度限制画出，或根据最低效率及其相应的导叶开度、叶

片转角的限制画出。

7. 水轮机的飞逸特性

水轮机带动发电机发出电力送往用户，而用户用电的情况是时刻变化的，所以发电机的负荷也是时刻在变化的。如果电力系统发生故障，会使发电机突然失去全部负荷（通称甩负荷）。这时水轮机主轴输出的功率除一小部分消耗在机械损失之外，其余大部分功率将驱使水轮发电机组的转速上升。在转速上升的过程中，如调速器的功能正常，它就迅速作用，关闭导水机构，切断水流，阻止机组转速继续上升。此种转速上升一般限制在额定转速的140%左右。如果在甩负荷转速上升的过程中，又发生调速器故障，不能正常关闭导水机构，这时机组的转速将会超过上述过速范围。根据水轮机型式的不同，这个转速可能达到额定转速的150～250%，这时称为飞逸转速。

飞逸特性是通过模型试验测定的。飞逸转速不会达到无穷大，它的大小与水轮机型式、导叶开度值和水头值有关。对转桨式水轮机它还与叶片转角值有关。

由于存在飞逸的可能性，所以水轮机转轮，发电机转子，主轴等转动部件的强度、振动等的计算都要考虑到飞逸转速状态。因为旋转部件的离心力是与转速平方成正比的。所以转动部件的设计要加大受力截面，从而要耗费更多或选用更优质的钢材。这是关系到机组结构的大问题，因此对防止飞逸或减小飞逸转速的研究是很有意义的。下面一些措施现在已得到应用。

1）利用导叶的偏心距把导叶设计成能随水流的作用自行关闭。即在调速器控制系统失灵后，导叶在水流作用下自行关闭，以防止飞逸。

2）对轴流转桨式水轮机利用它在叶片转角较大时飞逸转速有所下降的特性，在发生飞逸时使叶片转角增大，从而减小飞逸转速。

为防止飞逸或减小飞逸转速还有一些方法，但是这些都还不是十分完善的措施。这一问题还有待进一步研究解决。

四、水轮机结构

不同类型的水轮机，结构上具有不同的特点，本节介绍常用的几种类型水轮机的结构。

1. 混流式水轮机

混流式水轮机是最常用的一种水轮机，图 11 为大型立式混流式水轮机的一种较典型结构，现结合该图扼要介绍水轮机各主要部件的特点、构造等。

1）蜗壳与座环　蜗壳是水轮机的引水部件，由它将水流引导到水轮机导水机构四周。它的断面渐次收缩，其目的就是要使供水均匀，同时使水流形成环流。低水头电站，可采用混凝土蜗壳，其断面形状为梯形（图 27 所示便是混凝土蜗壳）。蜗壳包角φ_0一般为135°～270°（图33(1)）。40米水头以上的大、中型机组，都采用钢板焊接蜗壳，其断面形状为圆形和椭圆形。蜗壳的包角φ_0一般为340°～355°（图33(2)）。中、小型水轮机有用铸铁或铸钢蜗壳。

座环主要用来承受整个水轮发电机组的重量以及水轮机转轮的水推力。由于蜗壳引进的水流流经座环后才进入导水机构，因此它的承载支柱的截面应设计成流线形。承载支柱又称为固定导

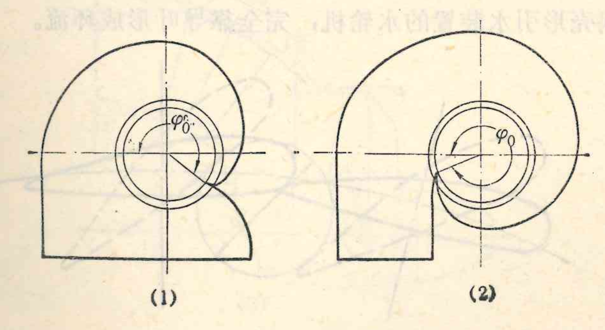


图33　蜗壳包角

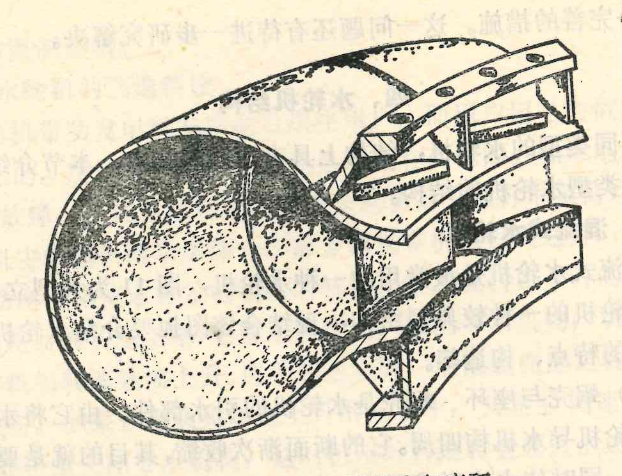


图34　全焊结构的蜗壳与座环

叶，它的数量一般为导水机构导叶数目的一半。如系铸造蜗壳，则座环与蜗壳铸成一体。钢板焊接蜗壳中，座环与蜗壳分别制造座环本身又有整铸、铸焊、全焊等不同结构。图 34 中的座环全焊结构。

2）导水机构　导水机构有三种功用：

（1）调节导叶开度a。可以改变水流方向及过流面积，从调节流量（图35）。

（2）使水流在进入水轮机转轮前，形成必要的环流，特对非蜗壳形引水装置的水轮机，完全靠导叶形成环流。

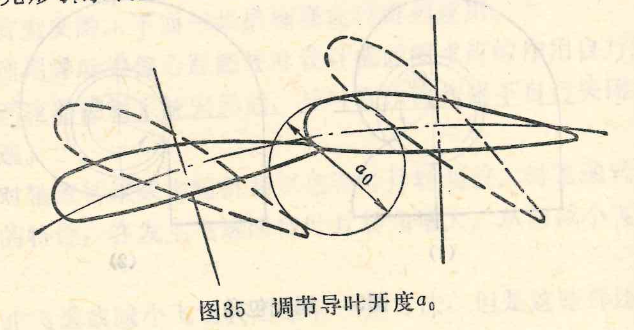


图35　调节导叶开度a_0

（3）导叶全关时起到阀门机构的作用，可切断水源。

导水机构一般有三种形式：

（1）径向式导水机构（图36(1)）

这种结构最简单，广泛地应用在混流式和轴流式水轮机上。

（2）轴向式导水机构（图36(2)）

这种结构中，导叶的布置类似于轴流式转轮的叶片。常用于

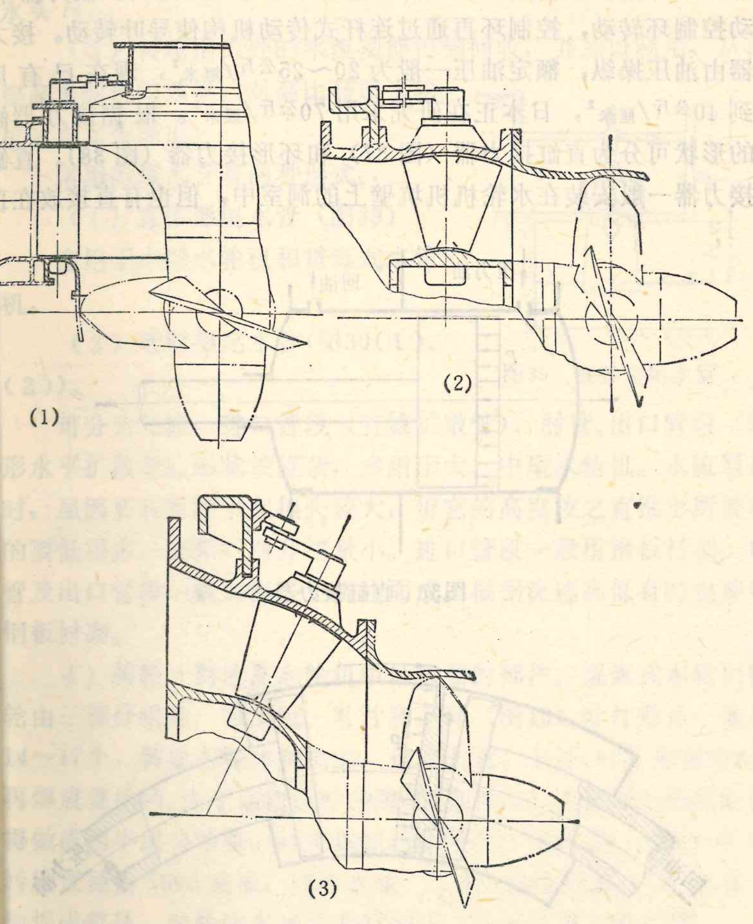


图36　导水机构的三种形式

贯流式水轮机中。

（3）圆锥式导水机构（图36（3））

这种结构常用在斜流式、贯流式水轮机中，在轴流式水轮材
中有时也采用。

导水机构部件包括：顶盖、底环、导叶、控制环及传动构件
等。导叶数目随机组由小到大选用 12、15、23 或 31。接力器 指
动控制环转动，控制环再通过连杆式传动机构使导叶转动。接力
器由油压操纵，额定油压一般为 20～25公斤/厘米²，现在已有用
到 40公斤/厘米²，日本正在研究采用 70公斤/厘米²。根据接力器缸
的形状可分为直缸接力器（图 37）和环形接力器（图 38）。直缸
接力器一般安装在水轮机机坑壁上的洞室中，但也有直接放在顶

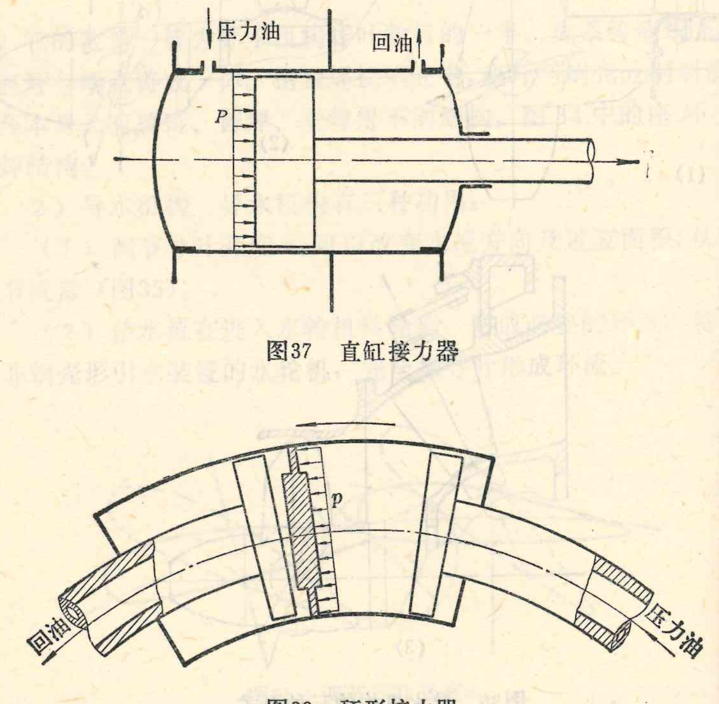


图37 直缸接力器

图38 环形接力器

盖上的，这种接力器用的较多。环形接力器则都直接放在顶盖上，这种接力器用的较少。

3）尾水管　尾水管也是反击型水轮机中一个很重要的组成部件，其主要功用是：

（1）将转轮出口的水流引向下游。

（2）当吸出高度为正时，能利用从转轮到下游水面的这段水头 H_s。

（3）转轮出口处的水流动能得到回收，并加以利用，从而提高水轮机的效率。对高比转速水轮机这点尤为突出。

常用的尾水管有两种形式：

（1）直锥形尾水管（图39）

多用于小型水轮机和贯流式水轮机。

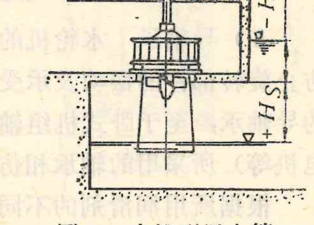


图39 直锥形尾水管

（2）弯肘形尾水管（图30（1）、（2））。

可分为三段：进口管段（直锥扩散管）、肘管、出口管段（矩形水平扩散管）。形状较复杂，多用于大、中型水轮机。水流通过时，虽因要转弯而引起损失较大，但它的高度较之直锥形所要求的要低得多，因而厂房开挖量小。进口管段一般用钢板衬砌。肘管及出口管段一般为混凝土浇注而成。根据流速高低有时也要用钢板衬砌。

4）转轮　转轮是水轮机中最重要的部件。混流式水轮机转轮由三部分组成，即上冠、叶片和下环（图40）。叶片数目一般是14～17个。转轮有整体铸出的，也有上冠、下环、叶片分别铸出，再焊成整体的。由于运输条件的限制，直径在4.5米以上的转轮都得做成两半组合结构，两半转轮的联结有多种结构。图 40 中的转轮直径为5500毫米，两半组成，上冠用螺栓联结，下环在工地焊成整体。转轮同主轴用螺栓联结，扭矩传递靠销或键。

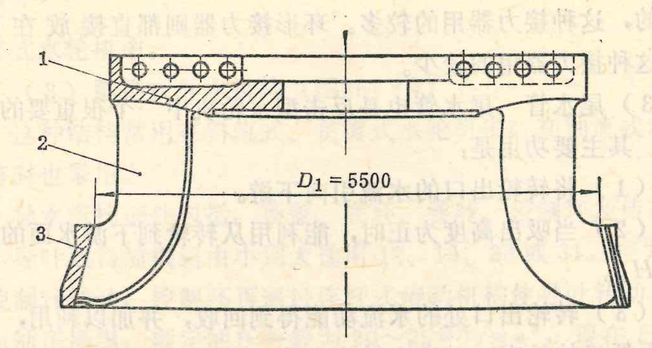


图40 混流式水轮机转轮

1—上冠；2—叶片；3—下环

5）导轴承 水轮机的导轴承和发电机的导轴承一样，用来防止旋转部件的摆动及承受径向负荷。这里着重介绍立式机组用的导轴承，至于卧式机组轴承与其它机械设备（如机床、交直流电机等）所采用的轴承相仿，这里不予介绍。

根据所用润滑剂的不同，导轴承可以分为三种：

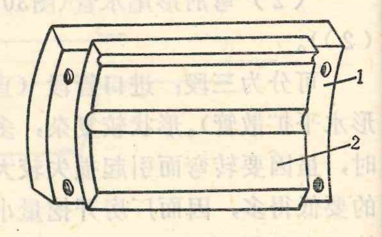


图41 橡胶轴瓦

1—金属瓦；2—橡胶

（1）水润滑导轴承 水润滑导轴承是以清洁水作为润滑剂的轴承。轴瓦用硬橡胶压制在金属瓦上（图41），再组合成轴承。和橡胶轴承相配合的主轴承颈部分要包焊不锈钢衬，以防锈蚀。润滑水源要非常可靠，对水质要求也较严。我国很多水轮机均采用这种水润滑轴承结构。

（2）稀油润滑导轴承 以稀油（一般用透平油）作为润滑剂，此类轴承结构型式很多，图42是带有旋转油盆的稀油自润滑筒式导轴承。轴瓦材料为轴承合金（即巴氏合金）。由于稀油自成小循环系统，因而一般要装设水冷却装置。稀油润滑轴承本身的结构虽较水润滑轴承复杂，但使用期较长，又不受自然条件限

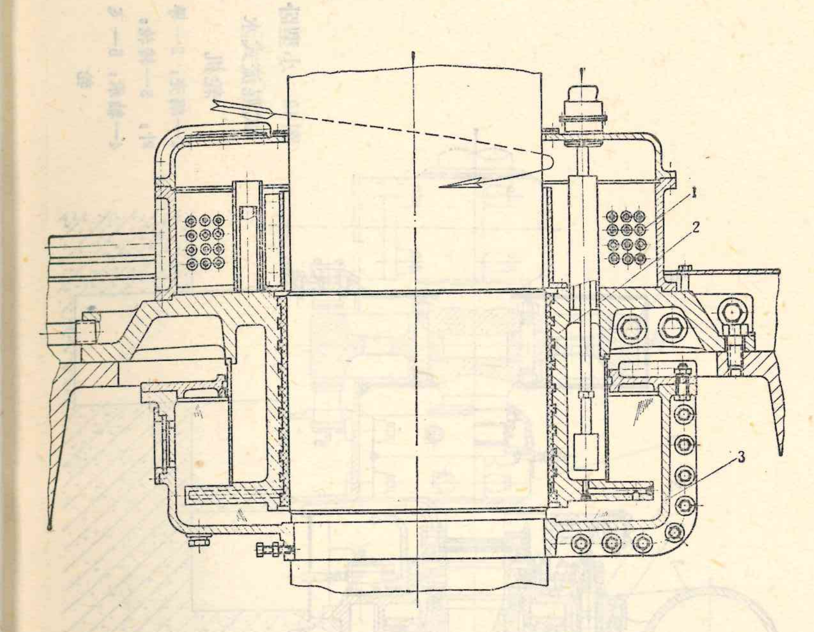


图42 稀油自润滑筒式导轴承

1—冷却器；2—导轴承；3—转动油盆

制，故为不少电站所采用。

（3）干油润滑导轴承 以润滑脂（俗称干油）作为润滑剂，轴瓦材料亦为轴承合金。结构尚简单，但需备有一套自动添加润滑脂装置（通常叫干油站）。缺点是润滑脂自上而下，用完后就排到下游，不能回收。这样不仅带来一定消耗而且给河流造成一定污染。

2. 小型卧式混流式水轮机

图43为小型卧式混流式水轮机结构，它的构造除卧式布置特点外，主要部件及其功用等与立式混流式水轮机一样。小型水轮机的转速一般都较高，和它直接联结的发电机的尺寸较小，重量较轻。发电机转动部分的转动惯量（即所谓GD^2值，参阅下

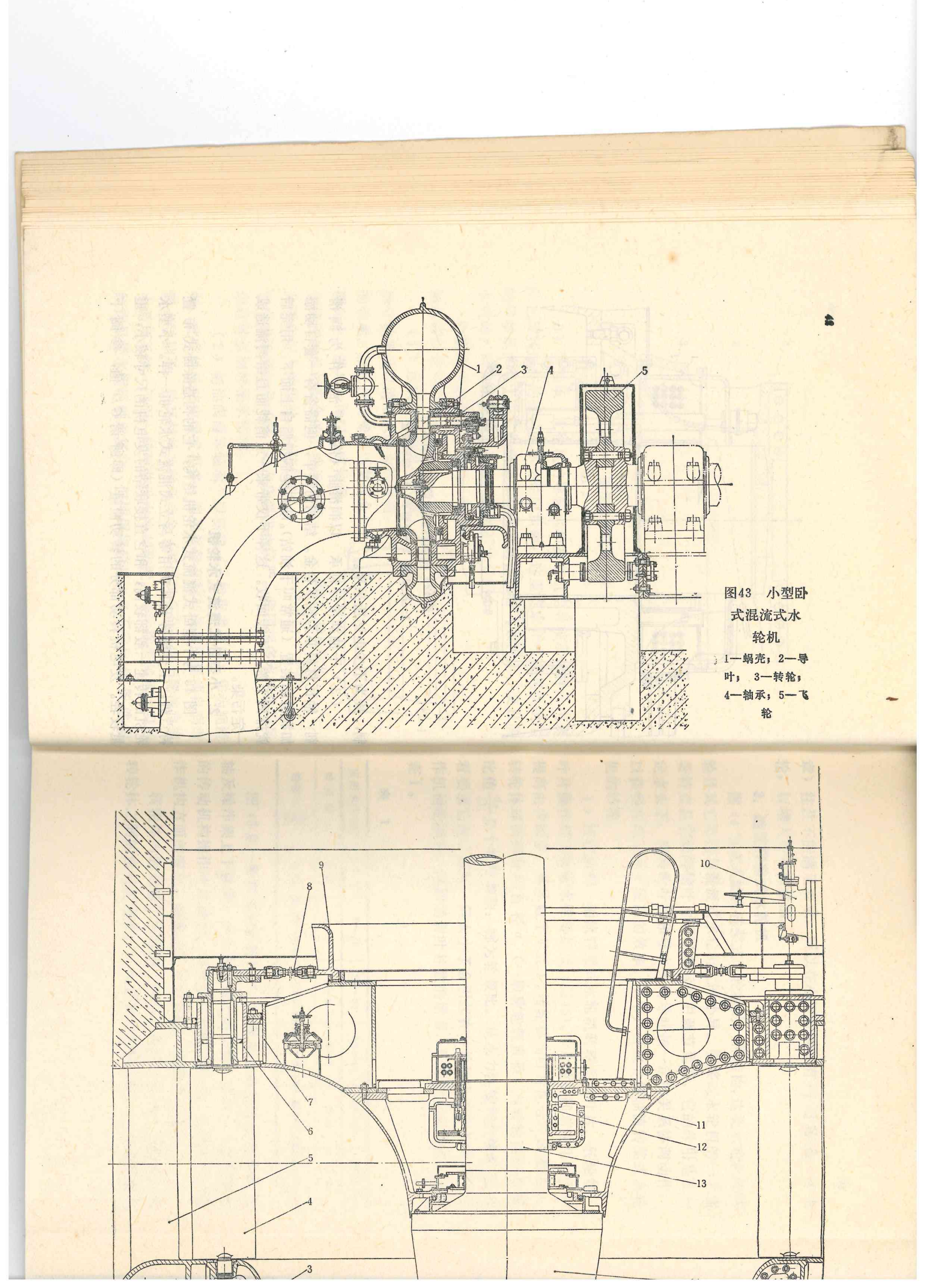


图43　小型卧式混流式水轮机

1—蜗壳；2—导叶；3—转轮；4—轴承；5—飞轮

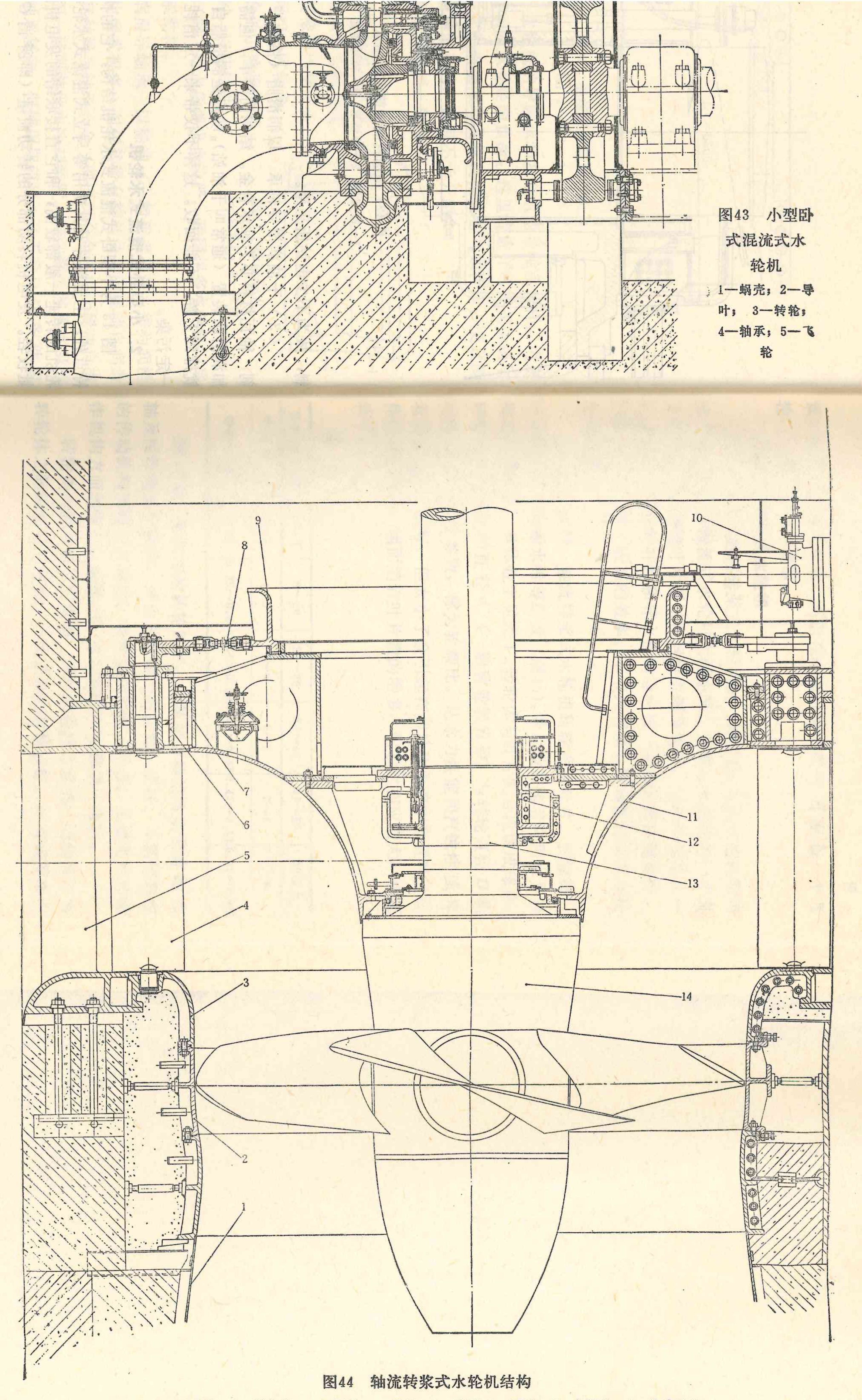


图43 小型卧式混流式水轮机

1—蜗壳；2—导叶；3—转轮；4—轴承；5—飞轮

图44 轴流转浆式水轮机结构

1—尾水管；2—转轮室；3—底环；4—导叶；5—座环；6—顶盖；7—支持盖；8—传动机构；9—控制环；10—接力器；11—下锥体；12—导轴承；13—主轴；14—转轮

章）往往不能满足要求，所以在小型机组中有时再配备一个飞轮，以增大转动惯量值。

3. 轴流转桨式水轮机

图 44 为立式轴流转桨式水轮机的一种结构，这类水轮机除转轮外其它结构与混流式水轮机大同小异。转桨式水轮机的一个显著特点是它的转轮叶片可以在运行中调节角度。它的作用是在一定水头下，使转轮叶片和导水机构导叶按一定的关系协调动作，以获得在该工况下较高的效率。本节只着重介绍轴流转桨式水轮机的转轮。

1）转轮结构　轴流转桨式水轮机转轮系由叶片、转轮体、叶片操作机构和泄水锥等组成（图45）。叶片数目随着应用水头的提高由少而多，具体数字见表 1 。转轮体与叶片配合段做成球体，转轮体球面部分的直径 d_g（一般称轮毂直径）与转轮直径 D_1的比值$\frac{d_g}{D_1}$是个特性参数，称为轮毂比。从水力性能和汽蚀性能来看要求它越小越好，但太小了会引起在转轮体内腔中布置叶片操作机构的困难，因而随着叶片数的增多，轮毂比相应增大，详见表 1 。

表　1

应用水头(米)	5以下	5～20	20～30	30～40	40～50	50以上
叶片数 z_1	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8
轮毂比$\frac{d_g}{D_1}$	0.33	0.35～0.41	0.41～0.43	0.43～0.47	0.47～0.51	0.51～0.60

图 45 是一种常用的转轮结构，转轮接力器的活塞带动操作轴及操作架上下移动，再由操作架带动转臂、连杆、耳柄等组成的传动机构操作叶片转动。转轮的结构形式很多，主要是叶片操作机构方面的变化。但操作叶片转动的原理都是一致的。

转轮体内腔充满了润滑油，而外面是压力水流，因此叶片与转轮体之间的密封很重要。一般采用密封性较好、结构较简单的

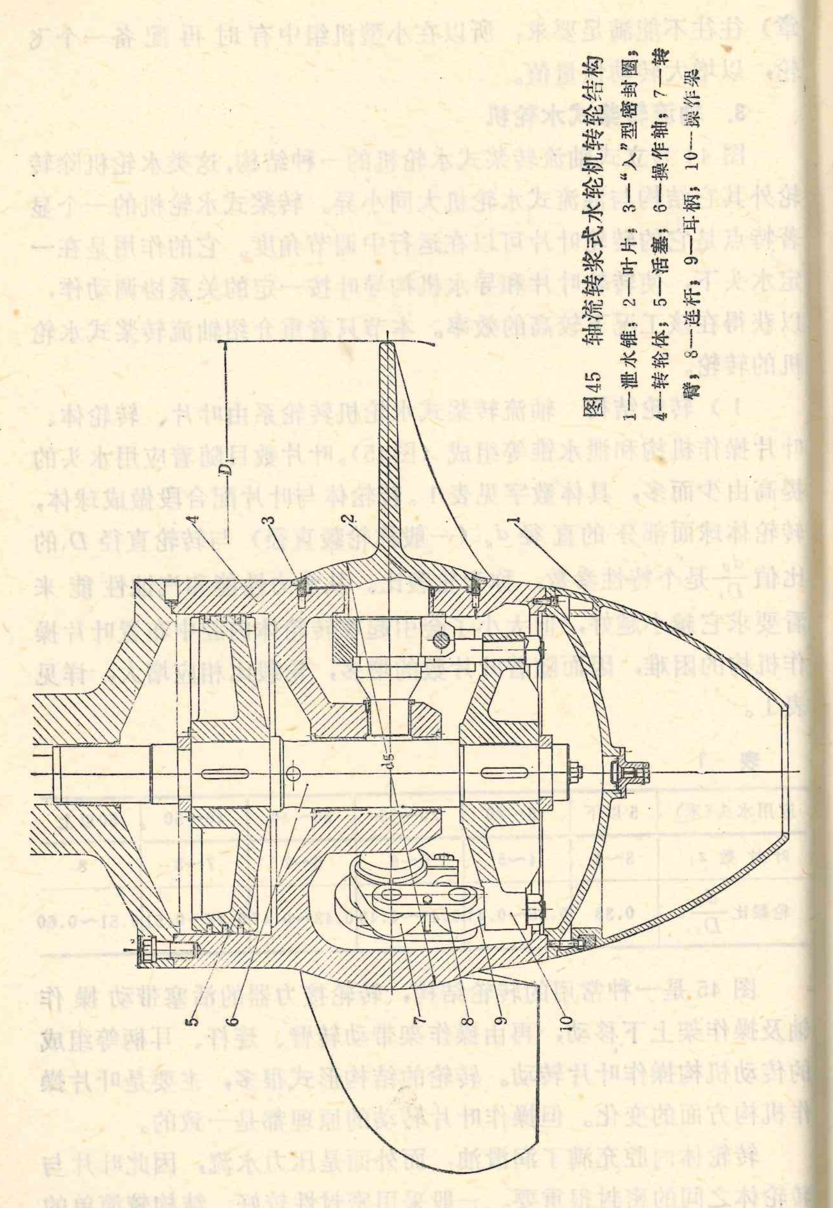


图45 轴流转桨式水轮机转轮结构

1—泄水锥；2—叶片；3—“人”型密封圈；4—转轮体；5—活塞；6—操作轴；7—转臂；8—连杆；9—耳柄；10—操作架

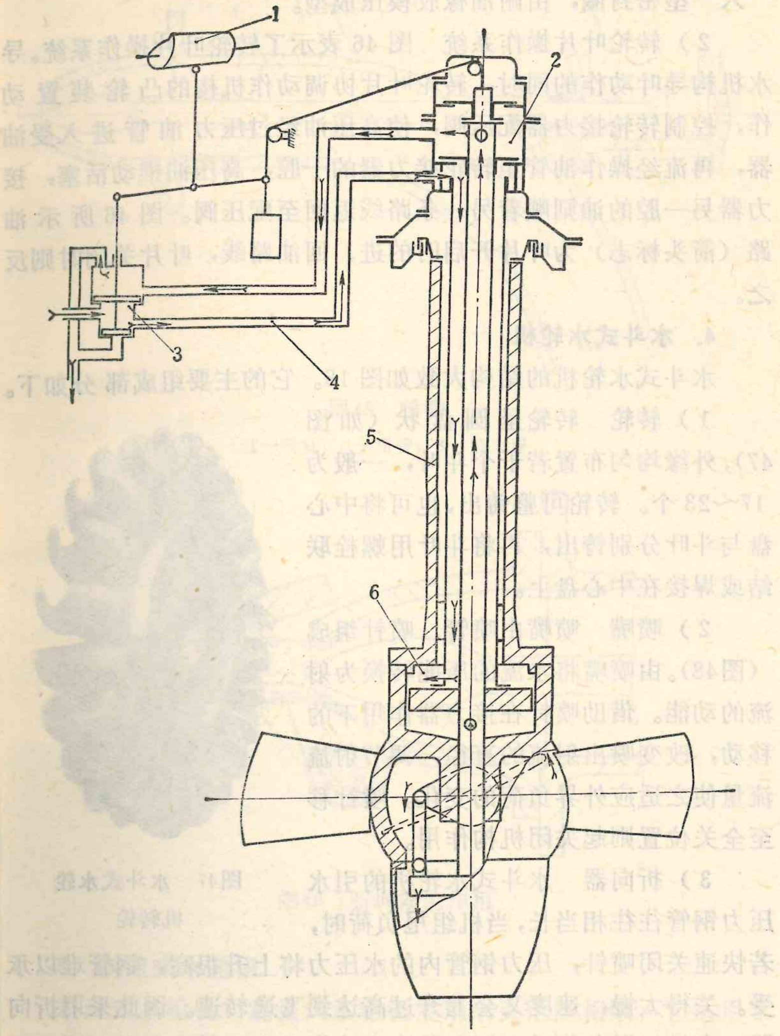


图46 轴流转桨式水轮机转轮叶片操作系统

1—凸轮装置，2—受油器；3—配压阀；4—压力油管；5—操作油管；6—转轮接力器

“入”型密封圈，由耐油橡胶模压成型。

2）转轮叶片操作系统　图 46 表示了转轮叶片操作系统。导水机构导叶动作的同时，转轮叶片协调动作机构的凸轮装置动作，控制转轮接力器配压阀，使高压油经过压力油管进入受油器，再流经操作油管至转轮接力器的一腔，高压油推动活塞，接力器另一腔的油则顺着另一条路线返回至配压阀。图 46 所示油路（箭头标志）为叶片开启时的进、回油路线，叶片关闭时则反之。

4. 水斗式水轮机

水斗式水轮机的结构大致如图 16。它的主要组成部分如下。

1）转轮　转轮呈圆盘状（如图47），外缘均匀布置若干个斗叶，一般为17～23个。转轮可整铸出，也可将中心盘与斗叶分别铸出，再将斗叶用螺栓联结或焊接在中心盘上。

2）喷嘴　喷嘴由喷管、喷针组成（图48）。由喷嘴将水流的压能转换为射流的动能。借助喷针在接力器作用下的移动，改变喷出射流的直径，调节射流流量使之适应外界负荷的变化。喷针移至全关位置则起关闭机构作用。

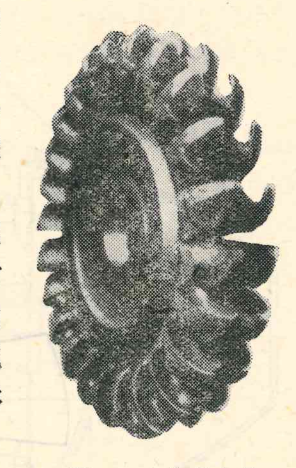


图47　水斗式水轮机转轮

3）折向器　水斗式水轮机的引水压力钢管往往相当长，当机组甩负荷时，若快速关闭喷针，压力钢管内的水压力将上升很高，钢管难以承受。关得太慢，速度又会上升过高达到飞逸转速。因此采用折向器，在机组甩负荷时，折向器快速动作，改变射流方向（图49），不使水流喷射到水斗上，从而控制了转速的上升。同时喷针缓慢关闭，可以避免压力钢管内的压力上升过高。

折向器和喷针通过凸轮及控制机构协调动作。

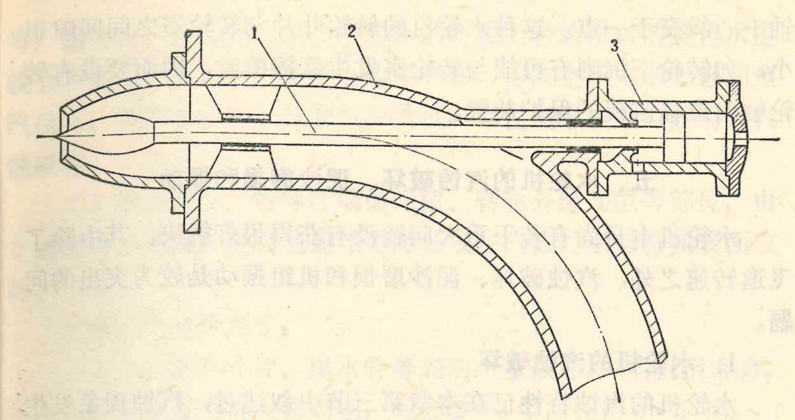


图48　喷嘴

1—喷针；2—喷管；3—接力器

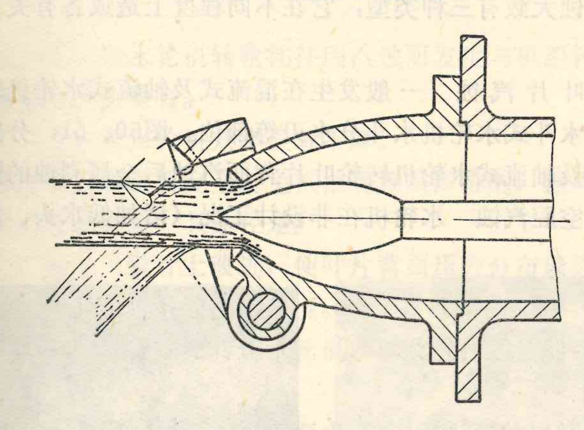


图49　折向器的作用

5. 斜流式水轮机

斜流式水轮机与混流式水轮机使用水头范围相似。它适用于水头和负荷变化幅度较大的水电站。由于叶片倾斜布置，而且要求转动，所以结构较复杂，制造工艺要求较高。

转轮叶片轴线与主轴中心线倾斜角一般为 45°。转轮叶片操作机构动作为一空间运动，要求叶片轴线、滑块销孔中心线及主

轴中心线交于一点。这种水轮机的转轮叶片与转轮室之间间隙很小，如转轮下沉则有可能与转轮室发生摩擦撞碰，因而要设有转轮轴向位移监视的保护装置。

五、水轮机的汽蚀破坏、泥沙磨损和振动

水轮机本身尚有若干重大问题没有获得很好解决。其中除了飞逸转速之外，汽蚀破坏、泥沙磨损和机组振动是较为突出的问题。

1. 水轮机的汽蚀破坏

水轮机的汽蚀特性已在本章第三节中叙述过，汽蚀现象发生在金属表面便会造成汽蚀破坏。金属的汽蚀破坏是很复杂的。水轮机的汽蚀大致有三种类型，它在不同程度上造成各有关部件的破坏。

1）叶片汽蚀　一般发生在混流式及轴流式水轮机转轮叶片背面及水斗式水轮机水斗分水刃等部位。图50、51，分别反映了混流式及轴流式水轮机转轮叶片背面汽蚀后金属剥蚀的情况。

2）空腔汽蚀　水轮机在非设计工况（诸如低水头、低负荷等）运行时，叶片出口处会产生旋涡，加上转轮出口的旋转水流就会形成大涡流。涡流的中心为真空区，若真空压力低于饱和蒸汽压力，便产生汽蚀，称为空腔汽蚀，常使尾水管进口处遭到汽蚀破坏。

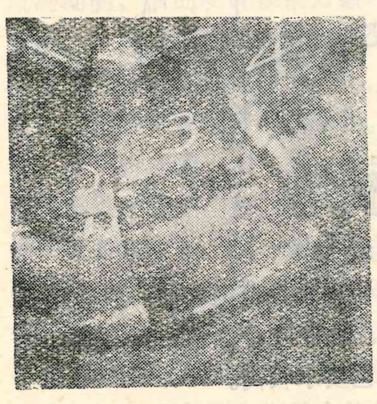


图50　混流式水轮机转轮叶片背面汽蚀情况

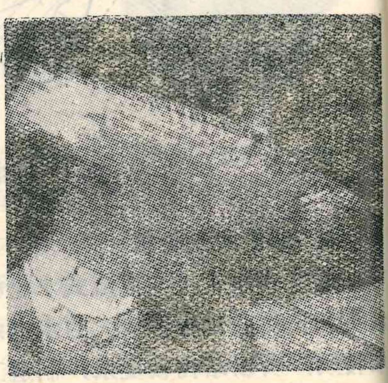


图51　轴流式水轮机转轮叶片背面汽蚀情况

3）间隙汽蚀　在导叶端面间隙、转轮外缘间隙等部位，由于水流流速很高，也会造成压力降低发生汽蚀，引起金属表面破坏。

汽蚀的严重性在于：

（1）使转轮叶片、尾水管等表面严重破坏，影响机组寿命，往往因此决定水轮机大修周期，短则2～3年，长则4～5年。

（2）发生空腔汽蚀时，会引起机组周期性振动，甚至损坏机组。

（3）反击型水轮机转轮往往因汽蚀而发生与机组转速无关的强烈振动及产生噪音。

（4）会引起水轮机效率显著下降。

一般来说水轮机要完全避免汽蚀现象是困难的，但可设法减轻汽蚀对机组的危害，其途径是：

（1）从水力设计上改进，使叶片背面压力分布较为合理。

（2）合理选择机组吸出高度。

（3）选择合理的比转速水轮机，以及选择适当的运行工况范围。

（4）在尾水管进口附近补充大气或压缩空气，以消除真空，避免空腔汽蚀。

（5）对易于汽蚀破坏的部件采用抗汽蚀破坏的材料如镍铬不锈钢。国外对混流式转轮、轴流式转轮叶片及水斗式转轮水斗，常用镍铬不锈钢整体铸出。我国混流式转轮叶片、轴流式转轮叶片也有用不锈钢铸成的，但大部分机组都是在转轮叶片易汽蚀区铺焊不锈钢板或堆焊不锈钢层。

2. 水轮机的泥沙磨损

我国不少河流夹带泥沙很多，这种夹带泥沙的水流流经水轮机，易使水轮机过流部件表面造成磨损。有些电站磨损极为严重，图52、53是较为典型的情况。

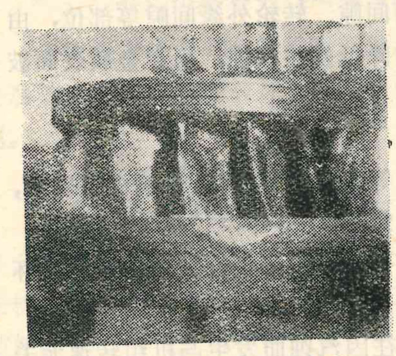


图52　一个混流式水轮机转轮磨损情况

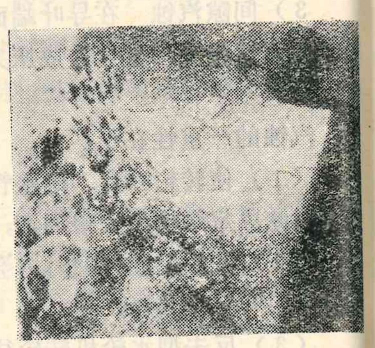


图53　一个轴流式水轮机转轮叶片磨损情况

磨损的轻重与多种因素有关，如泥沙含量、成分、颗粒直径，电站使用水头的变化，流速快慢，过流部份的形状、结构和材质等等。但是对这些因素的定量分析以及磨损理论的研究迄今还不很充分，所以目前只能提出一些减轻泥沙磨损的措施，这些措施大致有：

1）对泥沙含量大的河流，在规划水力枢纽工程时，应考虑建筑沉沙、排沙设施，让通过水轮机的泥沙尽量减少。

2）在易受磨损的过流部件表面敷设抗磨层（如铺焊抗磨板材，堆焊耐磨焊条，装设易于更换的抗磨板等等）。

3）考虑到泥沙磨损与汽蚀破坏有互为加剧的恶性循环，在易于汽蚀破坏的过流表面一定要采取抗汽蚀破坏的措施。

3. 水轮机的振动

水轮机的振动主要是由机械方面和水力方面的因素所形成。一般说来，前者可以通过提高零部件的制造和安装质量予以减轻。而对后者的振源分析、防止措施等，目前也研究得不够，一般认为下列几方面的水力因素均可能导致振动的发生。

1）水轮机发生汽蚀时可能引起振动。

2）尾水管的浪涌可能引起振动。特别在负荷变化时，会引起低频率的上、下振动，在额定功率的$\frac{1}{3}$～$\frac{1}{2}$时往往还伴有很大响声。向尾水管内补气可减轻这类振动。

3）除转桨式以外的水轮机尾水管内之大涡流可能引起振动。这种振动多在水轮机带低负荷或超过额定功率时发生。这种振动的频率若接近于压力水管的固有振动频率或者电力系统的固有振动频率，则有共振的可能。向尾水管补气可以减轻这类振动。

4）转轮进口的压力脉动可能引起振动。

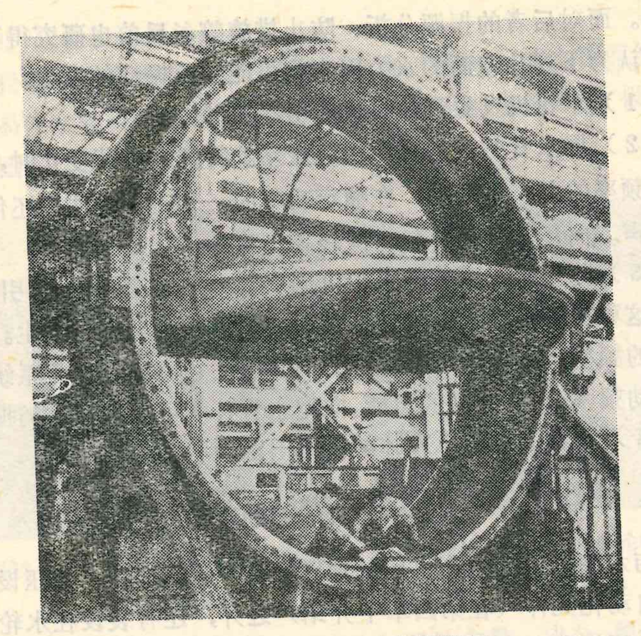
六、水轮机的辅助设备

与水轮机成套生产供应的辅助设备，除调速器、油压设备和水电自动化元件（在第四章中介绍）之外，还有装设在水轮机前的进水阀门和空放阀等设备。

当引到水轮机的压力水管距离较短，水压不高，那么利用水管进水口处的阀门便足以控制水流了。通常在进水口处设有所谓快速闸门，它可以在两分钟左右的时间内，从全开到全关，切断水源。

如果引水的压力管道较长，那时便要在水轮机的进水口处装设阀门。它的作用是，当水轮发电机组因紧急事故停机过程中，而导水机构又因某种原因不能关闭时，就要用这个阀门来切断水源，使机组停机。在正常停机过程中，如停机时间不长，这个阀门可以不关闭。下次机组起动时间就短了。此外它还可供检修时切断水源之用。在此情况下要求阀门的密封性能好，保证不漏水。

常用的阀门有两种，一种是供中、低水头用的称为蝴蝶阀，见图54，它的作用原理见图55。活门由接力器操作而转动。活门是一个中间鼓起的圆盘，采用铸钢或铸焊结构。


图54 直径为5.3米的蝴蝶阀

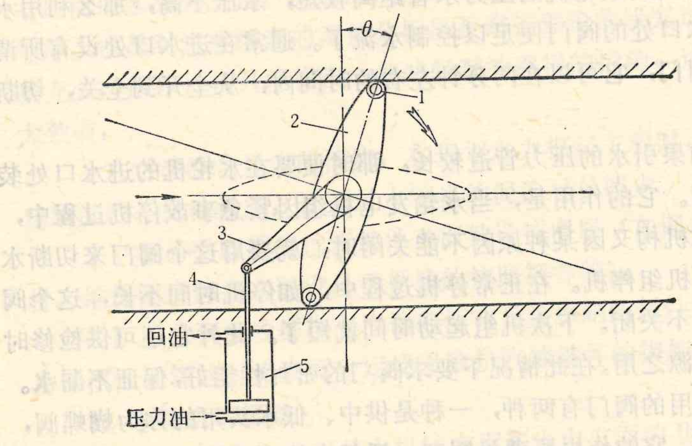


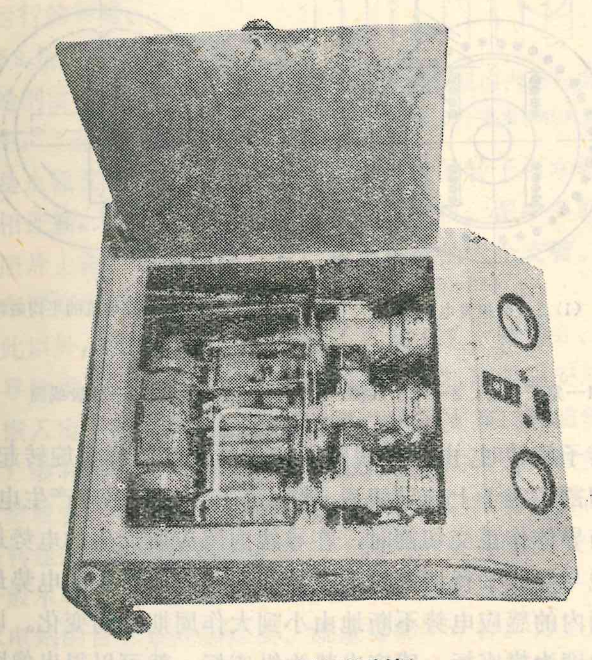
图55 蝴蝶阀作用示意图

1—密封圈；2—活门；3—拐臂；4—活塞杆；5—接力器

另一种是球形阀，它的作用和蝴蝶阀相同，适用于较高的水头。

蝴蝶阀和球形阀的开启和关闭可以通过控制柜自动操作。见图56。

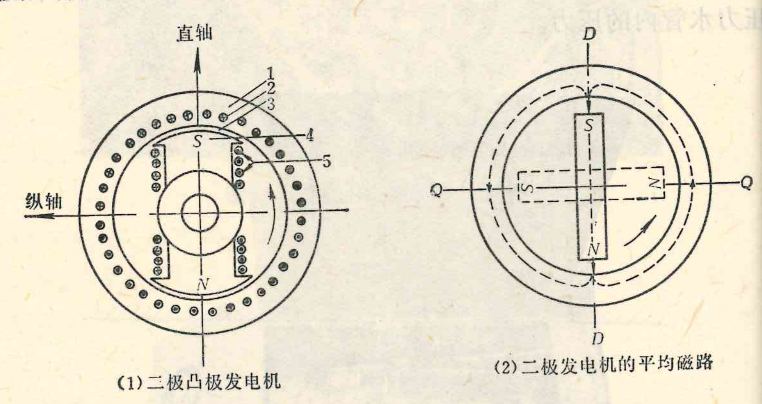
当水轮机导水机构快速关闭时，会使压力水管内的水压力突然上升，这种现象称为"水锤"作用，严重时甚至会使进水压力钢管爆破，造成电站重大事故。解决的途径：一是采用调压井，即在进水压力管路上的适当部位设一竖井，当进水压力管内压力突然上升之际，竖井内水位增高，消除管内压力的猛增；二是设置称为空放阀的阀门。它的作用是当水轮机导水机构快速关闭时，活塞迅速开放，把压力水管内的水流排到下游，因而降低了压力水管内的压力。


图56 阀门控制柜

第三章　水轮发电机

一、水轮发电机的作用原理

当导体在磁场内运动切割磁力线时，就会在导体内感应产生电势。图 57 是一个二极发电机的原理图。外边静止的部分称为定子。它的主要部分是一个用硅钢片叠起来的有槽的铁心，在它的槽内安放着定子线圈。中间的转动部分称为转子，转子上装有磁极，磁极上放置磁极线圈，在通入直流电后产生磁场。



(1)二极凸极发电机　　(2)二极发电机的平均磁路

图57　发电机作用原理图

1—定子铁心；2—定子线圈；3—气隙；4—磁极；5—磁极线圈

当转子旋转时，由磁极线圈所产生的磁场同样也旋转起来。旋转磁场切割了定子上的导线后，就在定子导线内感应产生电势。当磁力线与导体作正交切割时，在导线内感应所产生的电势最大；当磁力线与导线平行切割时，在导线内感应所产生的电势最小。因此线圈内的感应电势不断地由小到大作周期性的变化。以磁场的旋转角度为横座标，感应电势为纵座标，就可以得出像图58那

样的正弦波形。当电势每交变一次称为一个周期。每秒钟内的交变次数称为频率，它以每秒钟内周波数表示，单位为赫芝。我国电力系统所采用的标准频率为 50 赫芝。

以上是发电机的基本作用原理。如果要使转子磁场旋转，就需要外加动力来源。利用汽轮机来带动发电机，这就是火力发电；利用水轮机来带动发电机，这就是水力发电。所以水轮发电机的结构型式、转速和功率都和水轮机发生直接关系。当然水轮发电机的性能必须要符合电力系统运行的需要。

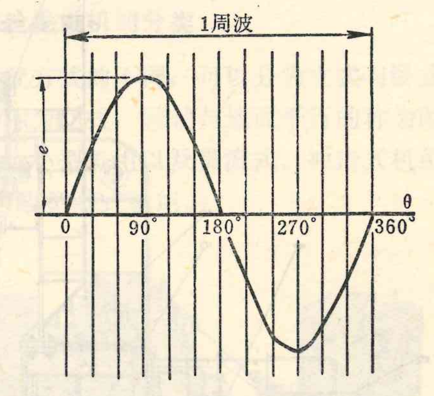


图58　单相发电机线圈内感应电势波形

e—电势；θ—磁场旋转角度

图 59 是一台立式水轮发电机的剖面图。

图中，1 是转速继电器，2 是永磁发电机，3 是励磁机。励磁机的转子与水轮发电机的转轴相连接。励磁机的下面便是水轮发电机。图中 6 就是相当于图 9 照片上露出在地面部分发电机上机架的六个支臂。往往把发电机布置在电厂厂房的地面下。

除此以外，发电机的主要部件还有定子 7、转子 8、推力轴承 4 和导轴承 5。发电机的空气冷却器 9 沿机座四周安放。定子铁心上嵌入定子线圈11。转子上则通过转子支架13和磁轭（转子的轮缘）装有磁极12。通常因为水轮发电机的转速比较低，所以它的极数较多。这种磁极凸出在磁轭外表面的结构称为凸极发电机与高转速的把转子线圈嵌入在转子体内的所谓隐极发电机不同。一般水轮发电机都采用凸极式的三相同步发电机。

水电站的自然条件如水头、流量等都不一样。为了充分发挥自然资源的有利条件，通常都是按各个电站自然条件的不同，设

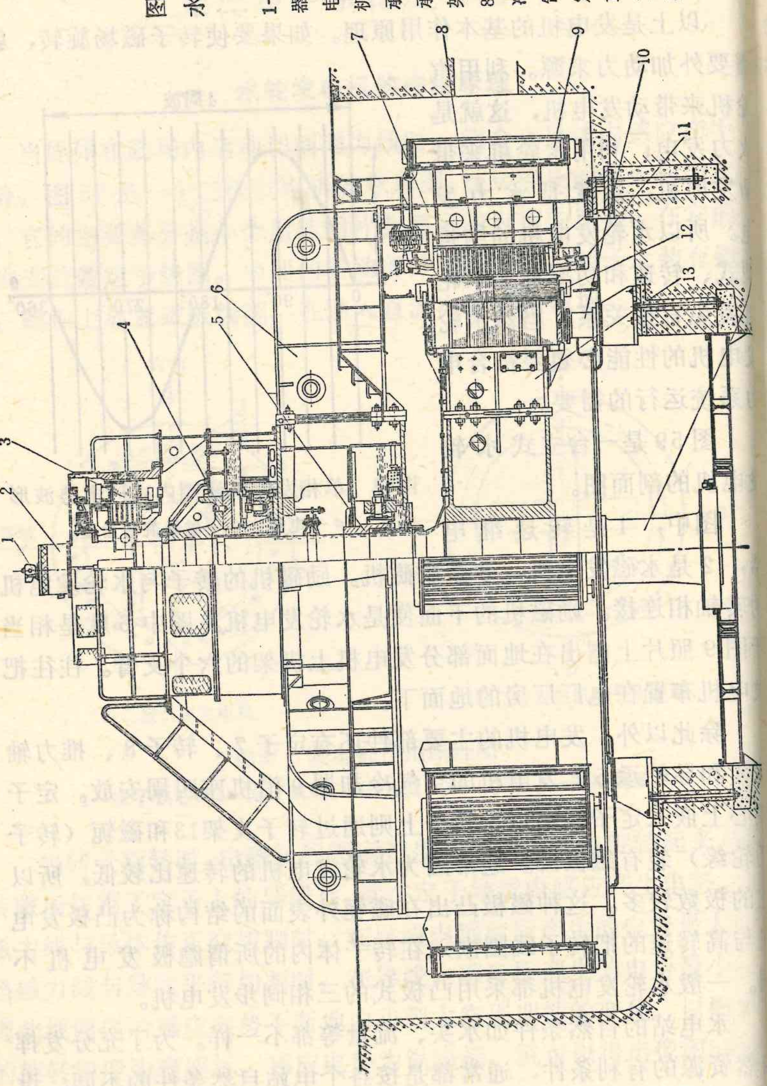


图59 立式水轮发电机剖面图
1—转速继电器，2—永磁发电机，3—励磁机，4—推力轴承，5—导轴承，6—上机架，7—定子，8—转子，9—冷却器，10—制动器，11—定子线圈，12—磁极，13—转子支架，14—转轴

计选用各自合适的发电机。因此制造厂生产的水轮发电机的规格比较多。在生产的品种较多以后，如遇到水能条件相似，就应尽量采用已有的机组，并逐渐形成系列。这样可以大量节省设计和生产准备的时间。

二、水轮发电机的分类

按水轮发电机组转轴布置方式的不同，可以分为立式与卧式两种，即转轴与地面垂直的称为立式，转轴与地面平行的称为卧式。大、中型机组多为立式。小型机组以及贯流式、冲击式机组则以卧式居多。图 60 为一台小型卧式机组。

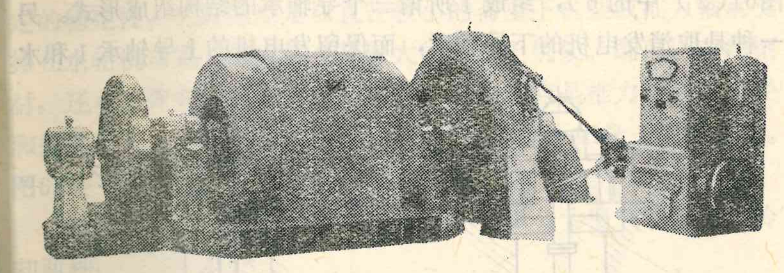


图60 HL004-WJ-65型3200千瓦卧式水轮发电机组

立式机组还可按轴承位置布置的不同而分成若干种不同型式。为了便于理解，这里先介绍一下水轮发电机的推力轴承和它的导轴承。至于它的结构将在后面介绍。

推力轴承 推力轴承的作用是用来承受整个水轮发电机组旋转部分的重量（其中包括水轮发电机的转子以及水轮机、励磁机等的旋转部分）和沿轴向的水推力，如图 59 中的 4 。它使整个机组能保持平稳与安全的运行。大型水轮发电机推力轴承的负荷可以高到三、四千吨。要把这样一个转动体支承好，这是关系到设计与制造的一个大问题，也是水轮发电机中的一个关键部件。它的位置影响到整个水轮发电机的结构。

导轴承　导轴承用来承受转子机械方面的不均衡和由于转子偏心所引起的单边磁拉力㊀。装在转子上面的称为上导轴承，装在下面的称为下导轴承。

图61是水轮发电机中常见的推力轴承与导轴承的四种不同布置方式。

1）悬型水轮发电机　图61（1）的布置方式称为悬型。这里推力轴承3布置在荷重上机架2的上部（有的布置在上机架中），把整个转动部分悬挂起来，所以称为悬型。在上机架中装有上导轴承1（有的上导轴承装在推力头的外缘。同时，在下机架5中还装有发电机的下导轴承4，连同水轮机上的导轴承（参见图61（2）中的6），组成了所谓三个导轴承的结构组成形式。另一种是取消发电机的下导轴承，而保留发电机的上导轴承1和水

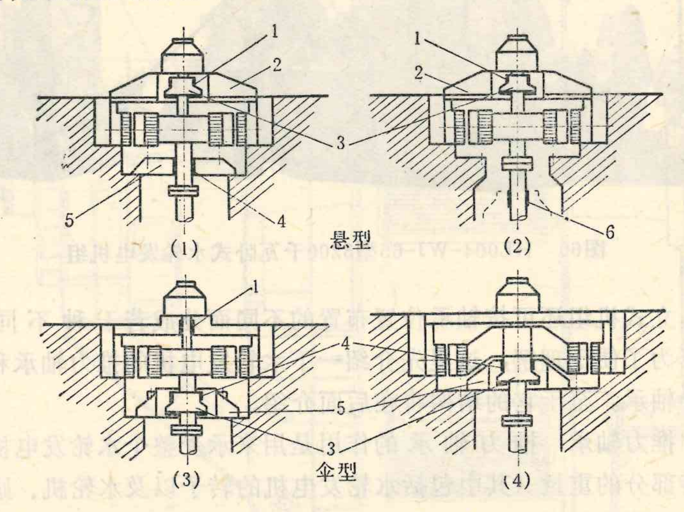


图61　悬型和伞型水轮发电机的示意图

1—上导轴承；2—上机架；3—推力轴承；4—下导轴承；5—下机架；6—水轮机导轴承

㊀ 在发电机定子、转子之间，互相有电磁力的作用。当转子偏心时，就会引起单边磁拉力。

轮机导轴承6，组成了所谓两个导轴承的结构方式，如图61（2）。

2）伞型水轮发电机　伞型机组的推力轴承3（见图61（3））安装在转子的下面，并固定于机坑基础上荷重下机架5中（有的装在下机架的上部），或支撑在水轮机顶盖的支架上。除了装在上机架的上导轴承外，还在下机架上装有一个下导轴承。如果仅有上导轴承而取消了它的下导轴承，或如图61（4）取消了它的上导轴承只留它的下导轴承与推力轴承。这时，称这种机组为半伞型水轮发电机组。

伞型机组一般适用于转速在150转/分以下的低水头电站。国外已有用在200转/分左右的伞型机组。这种型式要求机组具有一定的稳定性。它的优点是以直径较小的荷重下机架或推力轴承支撑在水轮机顶盖上来代替直径较大的荷重上机架。既可以节约钢材，还可以降低机组和厂房的高度。它的缺点是推力轴承的直径和损耗较大，设计制造较困难，在运行维护上不如悬式机组方便。图62是一台15万千瓦伞型水轮发电机组。

按照水轮发电机冷却方式的不同，可以分为空气冷却与水冷却两种：

1）空气冷却水轮发电机　这种水轮发电机内部所产生的热量，利用空气循环来冷却，还可以进一步分成以下三种：

（1）封闭式　封闭式空气冷却水轮发电机中空气的风路流通方式见图63。

如图63所示，空气在发电机内循环，带走热量，然后再通过用流动水冷却的空气冷却器（图63中2）与冷却水进行热交换。经过冷却后的空气重新进入发电机。这种把冷却电机的空气与外界隔开的冷却方式，称为封闭式。封闭循环系统能够保证进入发电机内的空气清洁，防止通风沟堵塞。

如图63所示，冷空气从机座外经过上、下两端，一部分进入到转子支臂间，然后从转子轮缘通风沟中进入到磁极间（见图63中1）。另一部分通过两端风扇的作用进到磁极间与发电机定子

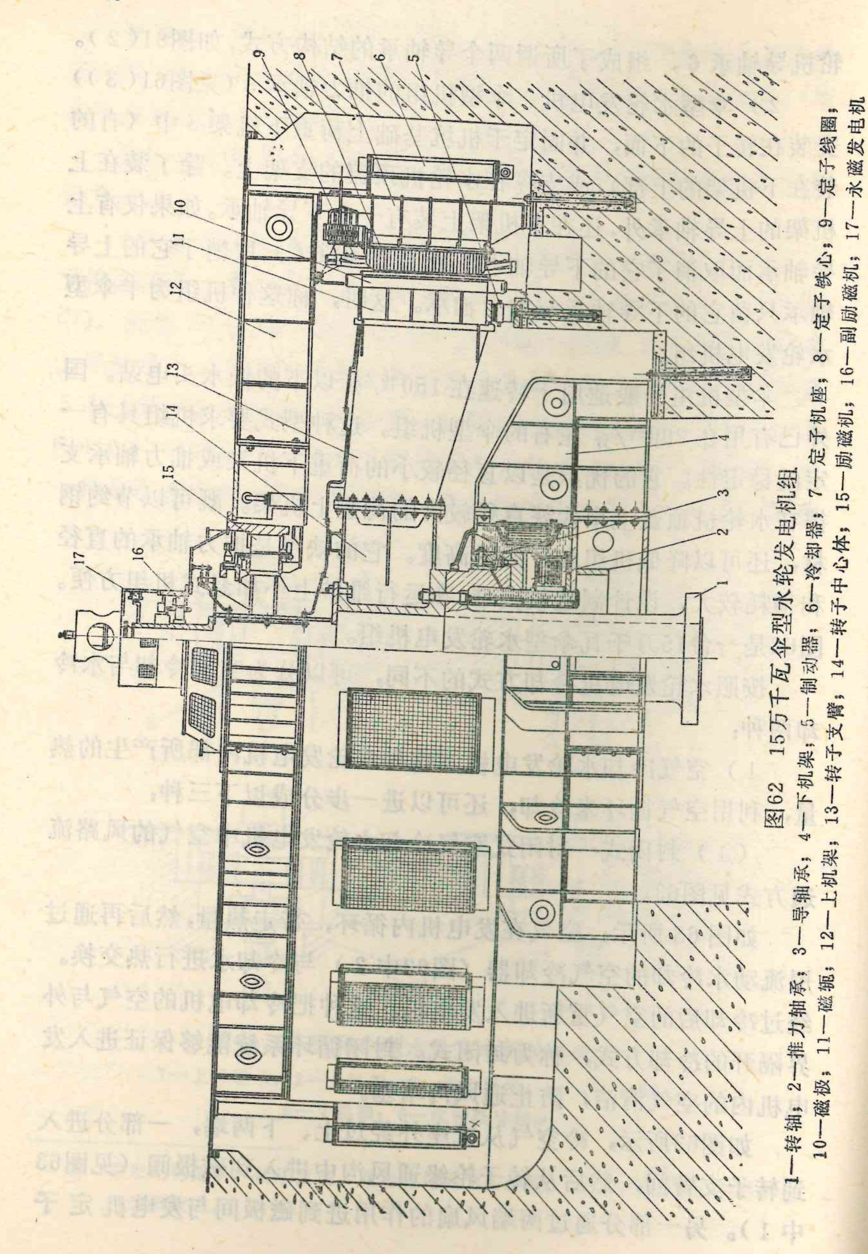


图62　15万千瓦伞型水轮发电机组

1—转轴，2—推力轴承，3—导轴承，4—下机架，5—制动器，6—冷却器，7—定子机座，8—定子铁心，9—定子线圈，10—磁极，11—磁轭，12—上机架，13—转子支臂，14—转子中心体，15—励磁机，16—副励磁机，17—永磁发电机

线圈的端部。空气在冷却了磁极线圈后，再通过气隙进入到定子铁心通风沟，或从定子线圈端部经压指、压板到定子铁心背部（图63中3），对定子线圈和铁心进行冷却。热空气由通水冷却的空气冷却器冷却后重复循环。大中型发电机多采用封闭式。

（2）开启式　一般小型水轮发电机采用开启式通风结构，即不断从大气中吸入冷空气进行冷却。经过发电机后的热空气又排出到大气中。这种冷却方式的缺点是，容易将空气中的尘埃带入到电机的内部，聚集在各散热面上，影响散热效果。

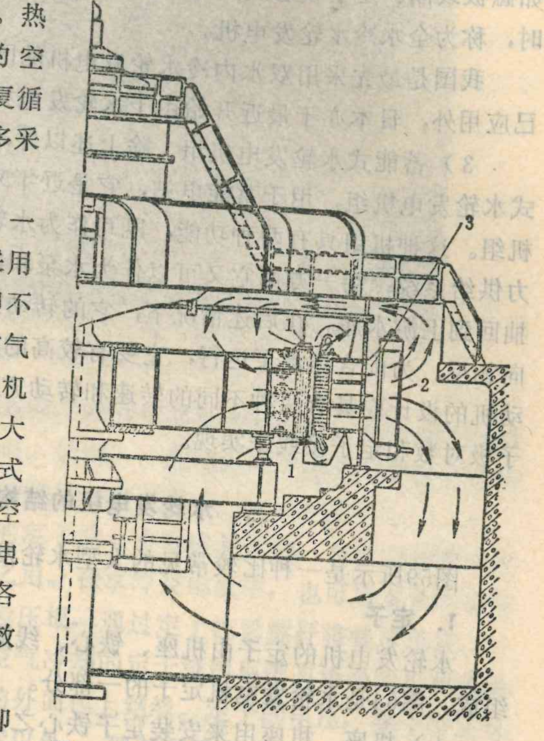


图63　封闭式空气冷却水轮发电机示意图

（3）空调冷却式　这是国外少数电站水轮发电机组试用的一种方式。将经过喷水清洗的冷空气送入发电机内部，吸收发电机的热量，排出机外。据称效果良好，但需要一套空气调节设备。

2）水冷却水轮发电机　将经过处理的冷却水通入转子励磁线圈和定子绕组线圈的空心导线内部，直接带走由损耗所产生的热量，叫双水内冷水轮发电机。要是只对定子绕组线圈进行水内冷，而转子磁极线圈与铁心仍用空气通风冷却，则可称为半水冷

水轮发电机。

当发电机的各部分，除了定子绕组线圈通水冷却以外，其余如磁极线圈、定子铁心及其端压板和推力轴瓦等亦均通水冷却时，称为全水冷水轮发电机。

我国是最先采用双水内冷水轮发电机的国家之一。现除瑞典已应用外，日本亦于最近开始用于水轮发电机。

3）蓄能式水轮发电机组　除上述以外，另有一种所谓蓄能式水轮发电机组，用于蓄能电站，它是近年来新发展起来的一种机组。这种机组具有两种功能，既可作为水轮机和发电机发出电力供给系统；另一方面它又可以作为水泵和电动机，将水自下游抽回到上游水库。在后述情况下，它的转动方向与发电机运行方向相反。为配合作水泵运行，它要有较高的转速。因此，这种电动机的设计应具有两种不同的转速和转动方向。通常采用改变转子极对数和定子接线来实现。

三、水轮发电机的结构

图59所示是一种比较常见的大型水轮发电机，它的结构如下：

1. 定子

水轮发电机的定子由机座、铁心、线圈绕组等几个主要部分组成。图64是水轮发电机定子的一部分。

1）机座　机座用来安装定子铁心之用，除小型发电机采用铸钢机座外，一般采用钢板焊接结构。如果发电机的外径不超过铁路运输规定的尺寸，则可以作成一个整体，否则就要分成几瓣（大型水轮发电机通常分成四瓣），制成后再在工地组装。图64便是已经下完了下层线圈分瓣定子中的一瓣。

机座应有一定的刚度，以避免定子变形和振动，并能承受定子短路扭矩。大型机座已有采用盒形结构的，既使机座具有一定刚度，又可节约钢材。

2）定子铁心　机座内装有定子铁心。它的作用是构成发电

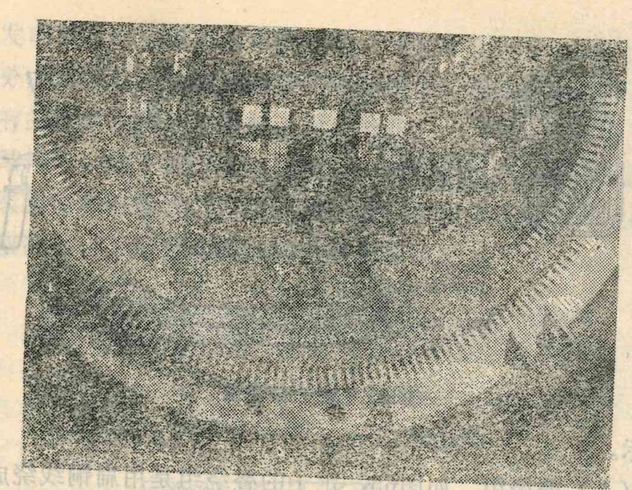


图64　水轮发电机定子的一部分

机的磁路，并可安放线圈。在交变磁场的作用下，实心铁心会因涡流损耗而使铁心发热。所以，一般均由0.5毫米厚的硅钢片冲制，在它的两面涂上绝缘漆后叠压而成。

空气冷却发电机的定子铁心常分成若干段，在段与段间设有通风沟，供通风散热之用。在水冷发电机中，也可用水来冷却铁心。铁心上、下端有齿压板，通过定子拉紧螺杆将叠片压紧。

3）定子绕组　空气冷却的定子绕组用带有绝缘的扁铜线绕制而成，然后再在它的外面包上绝缘。定子的电压，除小型发电机有采用400、3150伏以外，一般按容量大小分别采用6.3、10.5、13.8、15.75和18千伏等。水轮发电机绕组的绝缘，过去用的是沥青云母带浸胶绝缘。现在大型发电机采用B级胶粉云母绝缘㊀，提高了绝缘等级和电气性能。而且还可相应减薄绝缘，增加槽满率㊁，提高电机经济指标。

定子绕组主要有两种型式，即叠绕组和波绕组，各如图65和

㊀ 指用B级绝缘胶作粘结剂和小片云母组成的一种绝缘材料。

㊁ 槽满率是铜线实际所占的体积与定子铁心槽所具有的体积之比。

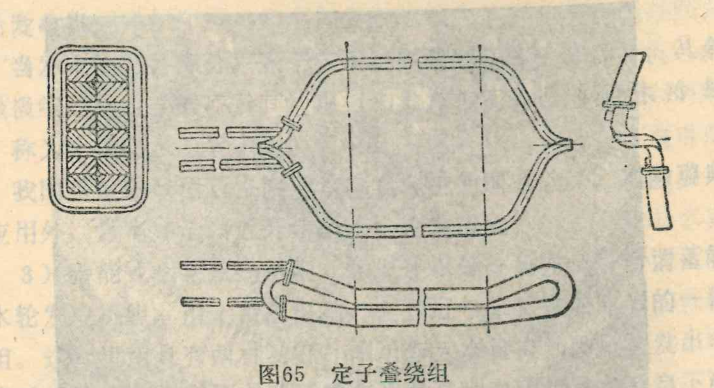


图65　定子叠绕组

66所示。

（1）叠绕组　如图65，定子的叠绕组是用扁铜线绕成环形的线圈。一般在定子铁心槽内放有上、下二层线圈。下线时，把叠绕组的两个边分别嵌入相邻两极的指定槽内的上层和下层，依次叠装并联成一体的绕组。每一个线圈边内可包含若干匝，而每一匝又可由多股绝缘铜线组成。这种叠绕组多用于中小型电机。

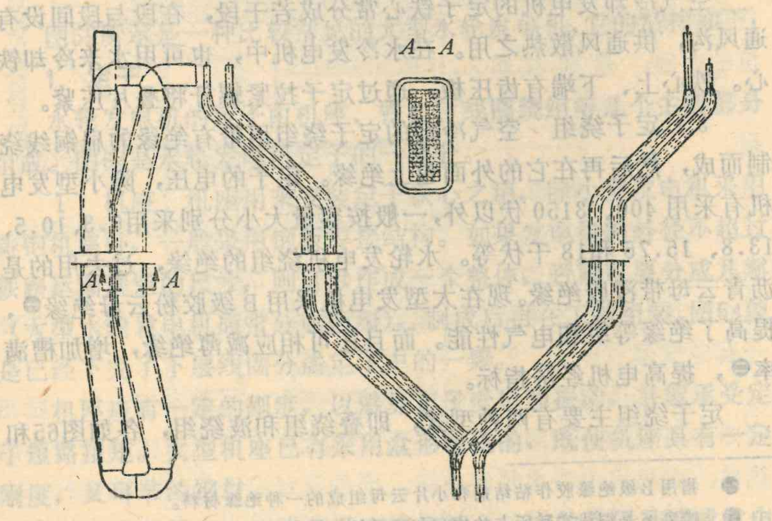


图66　定子波绕组

大型发电机也有采用单匝叠绕组的，为了便于制造，工艺上可将线圈分成两半，分别弯曲成型，包扎绝缘，再经处理后下线，然后把有关的两个线圈边联起来焊在一起。

结构上，为了减少发电机的附加损耗，须在线圈的适当部位变换线圈内扁铜线的位置，如图 67 所示，即依次把线圈内的扁铜线，依次上、下位置交换，称为编织换位。

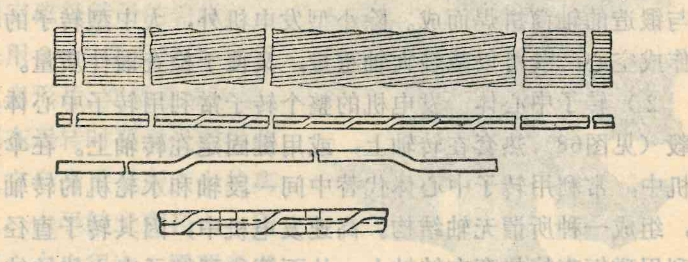


图67　线圈内扁铜线的编织换位

（2）波绕组　另一种绕组是波形的，不象环形这样成圈而是波浪形开展的。大中型发电机多采用单匝波绕组，槽内上、下层导线可用两线棒分别制造，然后按波形联接起来。同样，为了减少附加损耗，线圈内的扁铜线也要进行编织换位。这种绕组的安装维护较方便，可靠性也较高。当每个槽中有两个线圈边（即线棒）时称为双层波绕组。对水内冷发电机，为了减少定子线圈的水接头[⊖]数量也可以设计成为每个槽中仅具有一个线棒，即所谓单层波绕组。这种波绕组与双层波绕组相比较，线棒的个数减少了一半，水接头也相应地减少了一半，简化了制造工艺。采用单层绕组在选择槽数时，要考虑由高次谐波引起的电磁振动问题。

关于线圈的制造，B 级胶粉云母绝缘线圈的热压成型方法有模压与液压。模压是利用钢模，将单个线圈加热加压成型，外形尺寸较好，便于下线。液压是利用浸胶罐内沥青加热加压成型，这种线棒外形较差。

⊖ 水冷发电机的线圈用空心导线制成，在它的引出部分要用水接头。

2. 转子

转子上装有发电机的磁极，通过发电机转轴的一端与水轮机的转轴相连接。转子结构见图 68 。它由转轴、转子中心体、支臂、磁轭和磁极等部分组成。

1）转轴　转轴系用来传递转矩之用，并承受转动部分的轴向力，通常由高强度钢整体锻成；或采用铸焊结构，由铸造的法兰与锻造的轴筒拼焊而成。除小型发电机外，大中型转子的转轴均作成空心，既可以减轻大轴重量，又便于检查锻件质量。

2）转子中心体　发电机的整个转子常利用转子中心体上的轮毂（见图68)，热套在转轴上，或用键固定在转轴上。在伞型发电机中，常利用转子中心体代替中间一段轴和水轮机的转轴相连接，组成一种所谓无轴结构。高速发电机中，因其转子直径小，常利用磁轭直接热套在转轴上，从而简化了转子中心体的结构。

3）支臂　支臂是连接转子中心体与磁轭的桥梁。整个支臂成放射型，由钢板焊成工字形结构。大型机组中已有采用盒形支

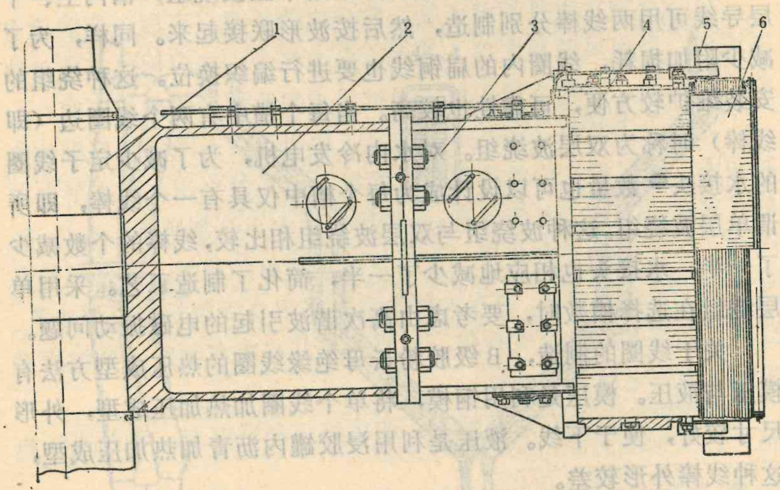


图68　水轮发电机的转子结构

1—转轴；2—转子中心体；3—支臂；4—磁轭；5—风扇；6—磁极

臂结构如图69。它的优点是节约钢材，提高周向抗扭刚度。

伞型机组中为了获得较好的稳定性，将支臂做成向下倾斜的型式，以降低机组的重心，见图62。

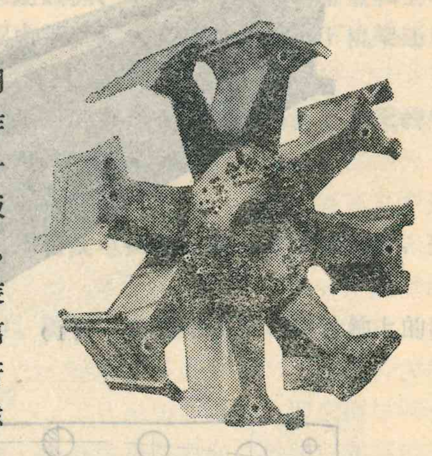


图69　盒形支臂

4）磁轭　磁轭的作用主要是用来作为磁路，并作为固定磁极转子的轮缘，一般采用 3～5 毫米厚的钢板冲成扇形片，交错叠成正圆。磁轭在运转时要承受磁极装配及它自身重量所产生的离心力。由于转子直径大，所以离心力也很大。既要考虑到飞逸转速时的转子强度，并要求具有一定的转动惯量，用的钢材较多，在转速高而直径又大的情况下，采用高强度钢板冲成。在转速高的发电机中，多采用正圆的锻钢磁轭，直接紧套在轴上，小型发电机中多采用铸钢磁轭。

5）磁极　当直流励磁电流通入磁极线圈后就产生发电机的磁场。装配后的磁极线圈见图 70（1）。它的结构示意图见图70（2）。磁极一般采用1～1.5毫米厚的钢板冲片叠压而成，两端加磁极压板，用螺杆压紧。在高转速发电机中也有采用整块锻钢制成。在极靴上装有阻尼绕组，它主要由阻尼条和两端阻尼环组成。转子装配时，将各极之间的阻尼环互相连接起来，成了所谓有纵横轴阻尼绕组的发电机。磁极采用T尾形或鸽尾形结构，固定在磁轭上。

6）风扇　低速发电机大都采用离心式、斗式或刮板式风扇。高速发电机则采用旋桨式风扇，后者效率较高，见图 68 中的 5 。

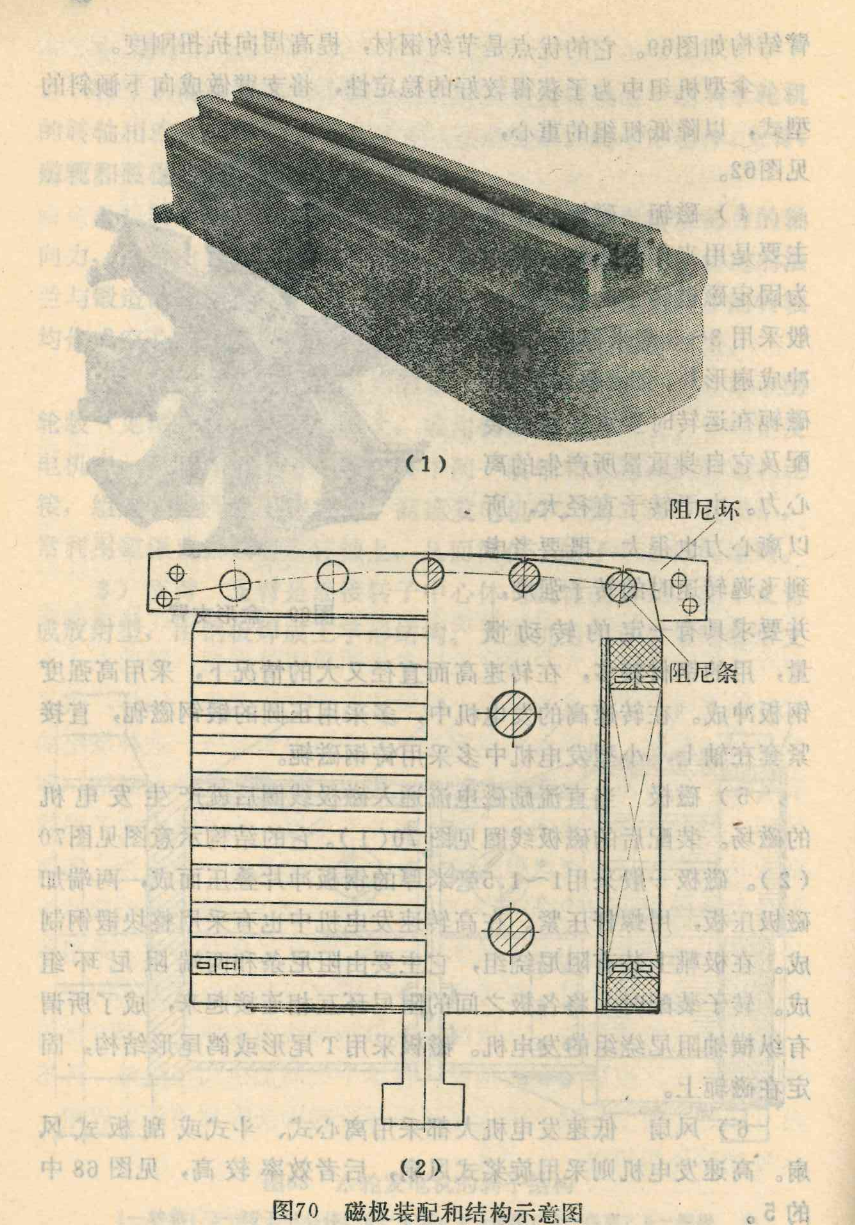


图70　磁极装配和结构示意图

3. 上、下机架

悬式机组的上机架除了用来支承整个旋转部分的重量与水推力外，一般上机架还要支承励磁机、永磁发电机等的重量和上导轴承的径向力。伞式机组则由下机架来支承，此外，下机架还承受下导轴承的径向力。

以往这种机架的支臂多采用工字梁形式，现在也有采用薄壁结构盒形支臂，使其载荷传至机座或基础上。

4. 推力轴承

如前所述，推力轴承是水轮发电机组中的一个关键部分，这里再说明如下。

推力轴承的结构如图71。图中1是固定在发电机转轴上的推

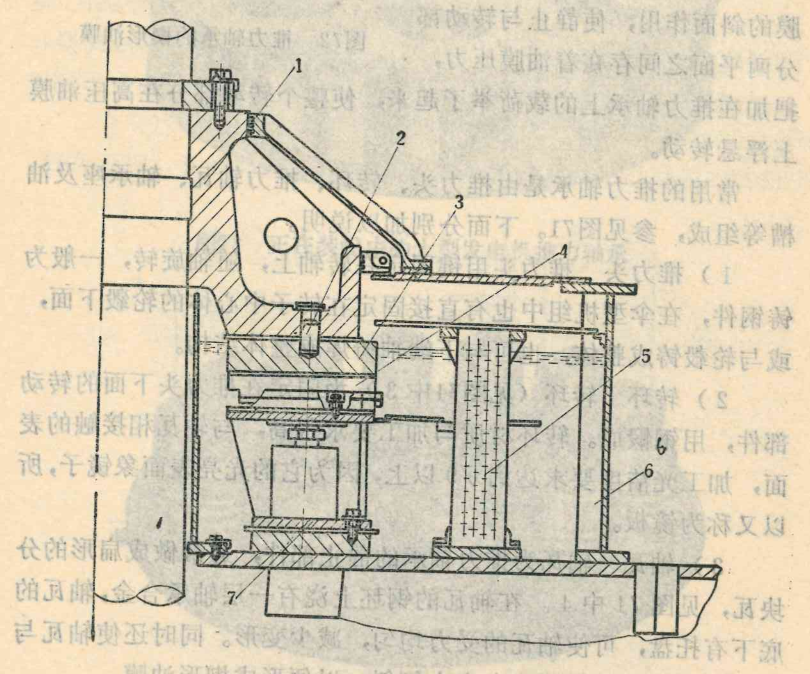


图71　推力轴承结构示意图

1—推力头；2—定位销；3—转环；4—轴瓦；5—冷却器；6；油槽；7—轴承座

力头。它把转动部分的负荷，传递给推力轴承。在推力头1的下面装有转环3（由定位销2与推力头1相对定位），通过油膜和其下的轴瓦4相接触。轴瓦系由球面支柱支承，可以自由倾斜。整个装置浸在润滑油槽6内，由冷却器5把油中的热量带走。当转环与轴瓦相对旋转时，就将润滑油带进转环与轴瓦的接触面之间形成一层油膜，使转环与瓦面之间形成液体摩擦。这层油膜的断面如图72所示，进油侧油膜较厚，出油侧油膜较薄，断面象个楔子，所以称为楔形油膜。由于这层油膜的斜面作用，使静止与转动部分两平面之间存在着油膜压力，把加在推力轴承上的载荷举了起来，使整个转动部分在高压油膜上浮悬转动。

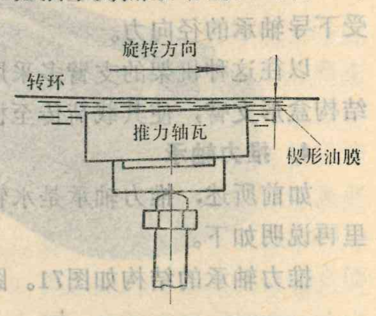


图72 推力轴承的楔形油膜

常用的推力轴承是由推力头、转环、推力轴瓦、轴承座及油槽等组成，参见图71。下面分别加以说明。

1）推力头 推力头用键固定在转轴上，随轴旋转，一般为铸钢件，在伞型机组中也有直接固定在转子中心体的轮毂下面，或与轮毂铸成整体，也可与下端轴铸焊成整体结构。

2）转环 转环（见图71中3）为固定在推力头下面的转动部件，用钢锻成。转环材质与加工要求很高，与轴瓦相接触的表面，加工光洁度要求达到▽9以上，因为它的光亮表面象镜子，所以又称为镜板。

3）轴瓦 轴瓦为推力轴承的静止部件，通常做成扇形的分块瓦，见图71中4。在轴瓦的钢坯上浇有一层轴承合金，轴瓦的底下有托盘，可使轴瓦的受力均匀，减少变形。同时还使轴瓦与托盘能在支柱螺钉圆头上自由倾斜，以便形成楔形油膜。

推力轴承的支承形式很多，如利用互相沟通的弹簧油箱或利

用平衡块的杠杆作用以平衡梁来支撑的结构，图73是正在装配中的大型发电机推力轴承，图74是推力轴承的弹簧油箱。

4）油槽与油冷却器 整个推力轴承装置在一个盛有透平油的密封油箱内，透平油同时起润滑和冷却作用。透平油吸收了推力轴承摩擦损耗所产生的热量，再借通水冷却的冷却器与油内的热量进行交换，把热量带走。为了加强油的循环冷却，还有在推

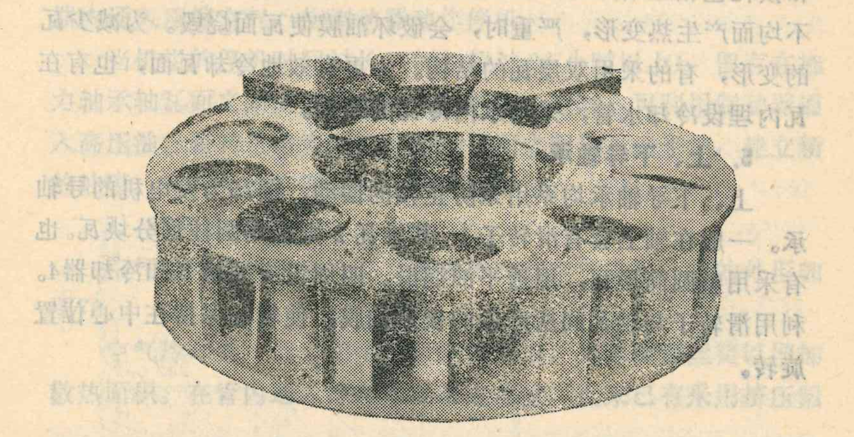


图73 正在装配中的大型发电机推力轴承

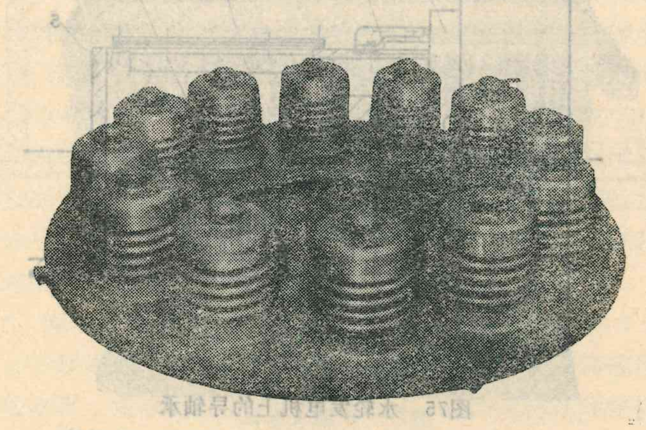


图74 推力轴承的弹簧油箱

力头或转环上开径向孔，使它在转动时产生油泵作用，加速油循环，或外加油泵将推力轴承油箱内的热油抽到油箱外部来进行冷却。油在油箱内循环而借油冷却器来冷却的方式称为内循环冷却。把透平油引到油箱外冷却的方式称为外循环冷却。

当水轮发电机的单机容量愈来愈大，推力轴承的负荷、直径和损耗也相应增大时，轴瓦除受力发生机械变形外，还会因温度不均而产生热变形，严重时，会破坏油膜使瓦面烧毁。为减少瓦的变形，有的采用双层瓦的结构。为更有效地冷却瓦面，也有在瓦内埋设冷却水管，采用水内冷瓦的结构。

5. 上、下导轴承

上、下导轴承均系用来防止轴的摆动，图75为发电机的导轴承。一般在轴上套有滑转子1，其轴瓦2则采用圆柱形分块瓦。也有采用整圆筒形瓦，用透平油润滑。四周设有油槽5和冷却器4。利用滑转子与轴瓦间所产生的楔形油膜，使转轴保持在中心位置旋转。

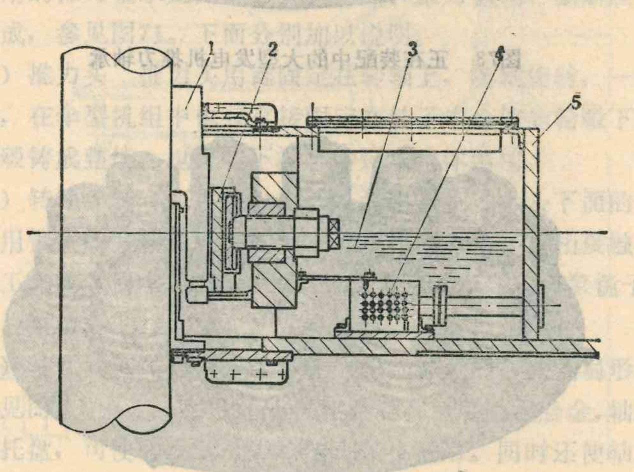


图75　水轮发电机上的导轴承

1—滑转子；2—轴瓦；3—润滑油；4—冷却器；5—油槽

6. 制动器

制动器有两个作用，一是制动，二是顶转子。为防止机组在停机时的低速下较长时间旋转，大中型机组均设有制动器。因为在机组卸去负荷停机时，由于转子的转动惯量，将继续转动，如在较低转速下运转时间过长，楔形油膜不能建立，有可能使轴瓦烧毁。所以当停机后转速下降到额定转速的35%左右时，在制动器内通入压缩空气，使制动器动作停机。

当机组的停机时间过长（例如超过24小时以上），留存在推力轴承轴瓦面之间的剩余油膜可能消失。这时，可利用制动器通入高压油，将转子略为顶起，使轴瓦面之间进入透平油，建立新的油膜。有时为检修需要，也要顶起转子。

7. 空气冷却器

空气冷却器是用来冷却发电机的冷却空气之用，它的外形如图76。

空气冷却器一般采用多排黄铜管制成。外部绕铜丝簧以增加散热面积。在管内通入冷却水以带走热量。近来已有采用挤压铝

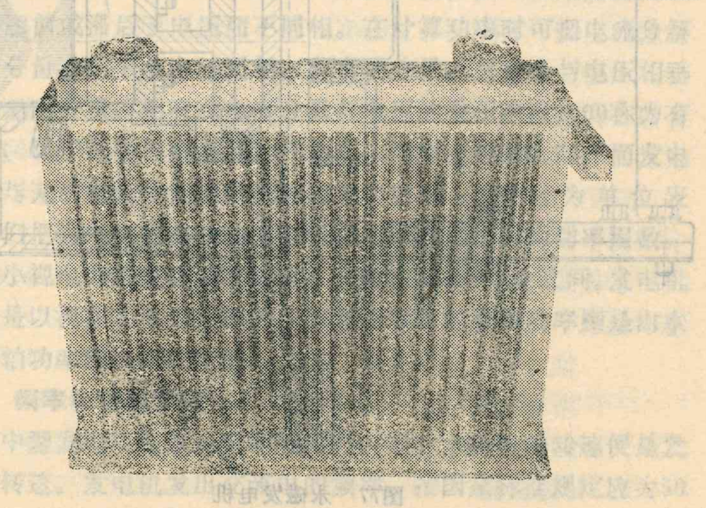


图76　空气冷却器

叶管以代替绕簧铜管，工艺较简单又可节约用铜。

8．辅机

随同发电机组成套供应的有励磁机（和副励磁机）以及供调速器用的永磁发电机。

直流励磁机常作成与发电机同轴，装在发电机上机架的上面。根据励磁系统的需要装设或不装设副励磁机。励磁电源为直流，它可以用直流发电机或交流发电机经可控硅整流后供给直流电。

永磁发电机装在发电机的顶部。它的结构型式见图77。永磁发电机用永久磁钢作磁场。就是说这种发电机的磁场是固定不

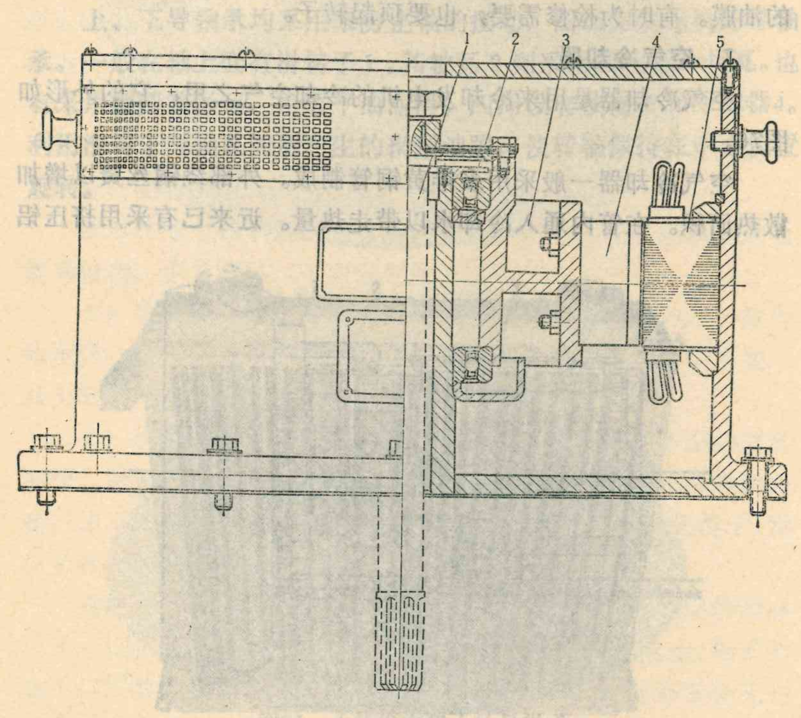


图77　永磁发电机

1—转轴；2—轴承；3—转子磁轭；4—永久磁钢；5—定子

变的，因而它的频率与电压是和发电机的转速成正比。它用来供给水轮机调速器的转速信号和飞摆电动机的电源。

四、水轮发电机的主要特性和参数

有关发电机的规格、特性和参数解释如下。

1．功率和功率因数

水轮发电机都是三相交流的，它的额定功率用千伏安表示，有功功率用千瓦表示。例如某台水轮发电机，它的额定功率为8.82千伏安，而它的有功功率为7.5万千瓦。

电压与电流是标志发电机的主要参数。单相交流发电机所规定发出的电压（伏）和它所发出的电流（安）的乘积除以1000称为发电机的视在功率（亦即额定功率），单位为千伏安。三相交流发电机的视在功率则是：

$$\frac{\text{线电压(伏)}\times\text{线电流(安)}\times 1.73}{1000}=\text{千伏安}$$

发电机的电压和电流的关系由负载的性质决定，电流的变换常常是超前或滞后于电压而不同相。在计算功率时可把电流分解为两个分量，一个与电压同相，称有功分量，另一个与电压相垂直，称无功分量。把有功电流分量与电压的乘积除以1000称为有功功率，以千瓦为单位表示。三相时，同样也要乘1.73。而发电机电压与无功电流分量的乘积称为无功功率，以千乏为单位表示。我们把发电机的有功功率与视在功率的比值称为功率因数。它的大小视电力系统的情况而定，一般在0.8～0.9之间。发电机的设计是以视在功率为根据的，但它能输出的有功功率则是由水轮机的轴功率输出来决定的。

2．频率和额定转速

大中型发电机与水轮机同轴运行，因此水轮机的转速便是发电机的转速。发电机发出交流电的频率，按国家标准规定应为50赫芝。如前所述，当频率一定时，发电机的极对数就决定于水轮发

电机的转速即水轮机的转速。转速越低，极数就要越多。这时发电机的直径就必需做得很大。对发电机来说是不经济的。从发电机的经济角度出发，希望能将水轮发电机的额定转速尽量提高。这是在发电机初步设计选型时所要考虑的。

3. 效率

发电机的效率是发电机输出的有功功率与输入到发电机的水轮机轴功率之比。发电机的主要损耗有定子、转子绕组中的铜损，有效铁心中产生的铁损，推力轴承和导轴承的机械磨损，发电机转动时的风磨损，以及其它附加损耗和杂散损耗。所有这些损耗都变为热能，使发电机的温度增高。因此必须对发电机进行通风冷却，使其温度稳定在许可范围以内。

提高水轮发电机组的效率的经济利益是很大的。提高发电机效率的措施有采用高导磁性能、低损耗的硅钢片以减少铁损，改善通风以降低风损，以及减少推力轴承的损耗等。

4. 温升

如上所述，发电机内的损耗转换成为热能，发电机内各部分温度就会高于周围的环境温度。超出环境温度以上的部分称为温升。水轮发电机及其励磁机在规定的使用条件及额定负载下，其各部分绕组及集电环与换向器的最高温度应符合第一机械工业部颁发的JB-861-66标准“水轮发电机基本技术条件”中的规定。

定子绕组的温度可用埋在槽中线圈层间的检温计来测量，对于浸沥青胶的B级绝缘，其最高温度不得超过105℃。

水轮发电机及其励磁机轴承的最高温度，在额定工况运行时，应不超过下列规定：

推力轴承及导轴承	70℃
滑动轴承	80℃
滚动轴承	95℃

5. 转动惯量

我们通常见到一些机械设备，如冲床，为了保证旋转速度的稳定而装有一个飞轮。当驱动转速忽低于或高于额定转速时，由于飞轮转动时的惯性，不会立即忽高忽低，会延缓转速的变化。延缓时间的长短与飞轮的直径和质量（重量）有关，从飞轮的这些数值和转速可以计算出来，这就称作飞轮旋转体的转动惯量。

水轮发电机在运行时，负荷时常会有变动，但是必须保证机组转速的相对稳定。要求水轮发电机组的转动部分有类似飞轮的作用来稳定转速，就是说转动惯量要大。转动惯量用GD^2来表示，单位为吨-米^2，其中G主要决定于转动部分的质量（重量），D主要决定于转动部分的直径，由于整个水轮发电机组转动部分的转动惯量主要决定于发电机的转动部分，而其中又主要地决定于转子的磁轭，因为它的直径大，质量（重量）也大。有时为了满足GD^2的需要而要人为地加大转动部分的质量（重量），如小型发电机有时也采取加装一个飞轮以满足转动惯量。

6. 电抗

水轮发电机中的线圈与磁路是一个电和磁的联结体，对整个系统有感性电抗，必须加以考虑。水轮发电机是凸极同步电机。定子所发出的电流也会建立一个反磁场，它会影响原有磁场，表现为一种电抗作用。这种电抗依磁极方向可以分成纵横两部分。把与磁极轴线重合的电抗，称为纵轴电抗。由于纵轴方向原磁路的饱和比较显著，这种电抗作用的影响也比较重要，因此一般对纵轴电抗要提出要求。

在发电机超负荷及突然短路时，它的电流、电压大量变化。由变化的初始瞬间，变化过程中，直至稳定有一个过渡过程。在同步发电机中对这种过渡过程的分析有所谓同步电抗、瞬变电抗与超瞬变电抗之分：

1）同步电抗　同步电抗用x_d表示，它是发电机正常运行下在定子端三相短路稳定时所表现出的电抗。同步电抗越小，发电机在电网中并列运行时越稳定。遇到负荷变化时电压变化小，发电机的超负荷能力大。但减少发电机的电抗将会加大发电机的定

转子空气隙和转子用铜量，增加制造成本。

2）瞬变电抗　瞬变电抗用 x'_d 表示，它是发电机在正常运行下发生三相突然短路初始一段时间的过渡电抗。它用来表示发电机绕组内在过渡过程中电流的特性，以及当发电机出线端短路时作用在基础上的扭矩。x'_d 一般在0.25～4之间。如要减少瞬变电抗就要使发电机的外形尺寸加大。x'_d 与发电机外形尺寸变化的比例关系大致为 $\frac{1}{\sqrt{x'_d}}$。

3）超瞬变电抗　超瞬变电抗用 x''_d 表示，它是发电机在正常运行下发生三相突然短路最初一瞬间的过渡电抗。它用来表示在发电机绕组内最初一瞬间通过电流的地方（约相当于第一个周波的电流值时），以及表示发电机出线端三相突然短路最初一瞬间作用在基础上的扭矩，发电机如无阻尼绕组的，则 $x'_d = x''_d$。通常 x''_d 在0.15～0.3范围之内。

7．短路比

短路比用 f_k 表示，它是发电机在空载额定电压时的磁势与三相稳定短路时电流为额定值时磁势的比值。通常用百分数表示。短路比说明电枢反应对发电机励磁系统影响的大小。它表示发电机在稳定工作情况下的稳定特性。上述5到7各项特性都和电力系统的网路有关，通常由制造部门与电力部门协商决定。

第四章　自动化与调速器

一般大中型水电站都采用自动化控制。当电厂内的值班人员在中央控制室（参看图10）拨动一下起动控制开关后，水轮发电机组即能自动起动，并使发电机投入电网运行。当机组需要停机（或当机组在运行中遇到故障时），则可拨动停机控制开关，使水轮发电机组自动卸去负荷，电网断电进行停机。一般在几分钟内就可以起动或停机完毕。

一、自　动　化

为了便于叙述，按自动化内容与范围的不同，可分为机组自动化、电站自动化和电力系统自动化三个方面。

1．机组自动化

机组自动化是指有关水轮发电机组本身运行、保护及控制方面的自动化系统、元件与装置。水轮发电机组的控制与操作方式可分为三种：

1）手动操作　一般小型机组均采用手动操作。

2）中央控制室远距离控制　由电站的中央控制室发出一个命令信号后，机组即按预先规定的顺序自动实现机组的正常起动与停机、增减负荷或在事故状态下的紧急停机。此外，在机组各必要的部分设有监视和保护的元件，用以监视和保护机组的运行。

3）全自动控制　国外一些小型机组有的采用全自动控制，这种机组平时无人管理或委托代管。有的按昼夜时间发电或停电。有的按水流情况，有水发电，无水停电。也有按系统负荷的要求，在系统负荷高的时候发电。

2. 电站自动化

电站自动化是指整个电站运行、保护的自动化系统和设备。

1）遥控 遥控或远动化是指电站内的设备可以由远离电站的电力调度中心，或是在梯级电站㊀的电力调度中心实现对机组的控制。

2）数据集中检测 由于电站和机组容量的增长，自动化程度要求不断提高，大中型水电站日益迫切需要对发电设备及输电线路的大量数据实现自动化集中测量、监视和记录，即所谓数据自动检测。

发电过程的数据是了解、控制和调节生产过程的依据，并可利用积累的数据资料来分析和改善生产过程，为进一步保证电厂的安全运行和提高自动化程度创造条件。图78是新安江水电站装设的数据自动检测装置。

3）计算机控制 国外已有少数电站采用计算机参予控制的方式。

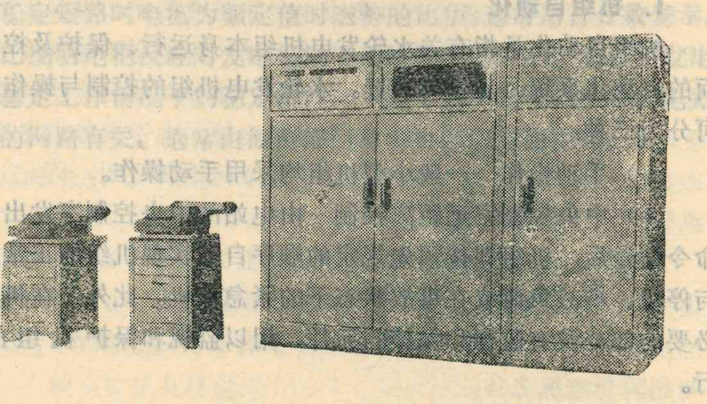


图78 数据自动检测装置

㊀ 在有条件的地方，一条河流上可以设置若干个水电站，设在上游水电站所排出的水，还可供设在下游的另一水电站发电之用，依次一级一级地组成了所谓梯级电站。

其它尚有如按水位、流量自动调整，以提高水电站的运行效率，这可视需要选用。

3. 电力系统自动化

电力系统自动化主要是为实现整个电力系统网路的自动化控制，借以提高系统运行的灵活性和供电质量。

1）系统的频率和有功功率自动调整 现代化电网可使系统在用户端的频率稳定在±0.01～0.02赫芝范围之内（按国家标准规定为±0.5赫芝）。

2）系统电压和无功功率自动调整 现代化电网可使系统在用户端的电压稳定在±1～3%额定电压范围内（按国家标准规定为±10%额定电压）。

3）电力系统的继电保护。

4）电力系统负荷的经济分配 把电力系统的负荷按经济合理方式分配于各电站。在水电、火电混合的电网内，使水电、火电之间各按适当原则进行分配。

通常机组自动化所需的设备是由水轮发电机组制造厂成套供应。

我国大中型电站一般均具有由中央控制室远距离控制机组的自动化水平。

另一方面按自动化的作用，大致可分为自动控制与自动调整两大部分。

1. 自动控制

为了保证水轮发电机组的安全可靠运行，使机组能按照预先制定的程序实现起动、停机等操作，并在机组各部分设置各种必要的监视、保护、信号和执行元件。有关这些称为机组自动控制。

2. 自动调整

水轮机调速器和发电机励磁调节器均属于自动调整设备。

水轮机的自动转速调整和发电机的自动电压调整就是要使水

轮机的转速（亦即发电机的频率）或发电机的端电压维持在标准规定的许可范围以内。当机组的转速或电压的实在值偏离了规定的许可范围时，自动调整装置应能自动地起调整作用，使机组纳入到正常运行要求的范围之内。这就是调速器和励磁调节装置的功用。

二、水轮机调速器

调速器主要用来调节水轮机组转速。不过一台近代化的水轮机调速器的功能并不局限于此。它的功能有：

1）实现机组的起动、停机和增减负荷。

2）在单独一台机组运行时调节水轮机的转速（亦即发电机的频率）和出力。

3）与其它机组并联运行时，机组间负荷的自动分配。

4）充当电力系统自动调频或调功的执行环节。

5）实现制造厂向电力部门提供的保证事项（转速上升、导叶关闭时间等）。

下面表 2 中所列为我国现有调速器的品种型号。

表 2　调速器的品种型号表

分类	单调整（混流式，轴流定桨式）			双调整（轴流转桨式，斜流式）			双调整（水斗式）		
	大	中	小	大	中	小	大	中	小
机械液压	T	T XT CT GT	XT TT GT	ST	ST				
电液	DT JDT	DT BDT	DXT	DST JDST	DST BDST				

注：T—调、特；S—双；B，J—晶体管；C—中；D—电；X—小；G—工人（牌）。

所谓单调整是指调整的对象为导叶接力器。所谓双调整是指除了调整导叶的接力器之外，还调整转轮叶片的接力器（轴流式、斜流式）。在水斗式水轮机中，则要调整水轮机的喷针和折向器，这是属于另一类的双调整。目前这方面的水轮机不多，所以还没有合适的调速器。表 2 中仅列出了型号，实际上，每一型号中，按它所具有的操作功的不同，还可分为若干种不同的品种。例如DT型调速器中有DT-100，DT-150型等品种。后面的数字分别表示调速器主配压阀的直径为 100 或 150 毫米等。而 XT-600，XT-3000，GT-1500 等品种，在型号后面的数字分别表示该调速器所具有的操作功（单位为公斤-米）。

1. 调速器作用的基本原理

当上、下游水位不变，即在一定水头下，水轮机所输出的功率与流量成正比，亦即水轮机所输出的机械能是和它所获得的水能相适应的。此时，水轮机在额定转速下运行。

通常在一个相当长的时间内（例如按季节情况），可以假定水头是稳定的，那么水轮机的流量就决定于导叶的开度。换句话说，水轮机导叶的开度规定了水轮机输出功率的大小。

但电网需要的负荷是经常在变化的。水轮发电机组输出的功率是和电网需要的负荷相适应的，这时如不调整水轮机导叶的开度，水轮机的转速就会随着负荷的变动而变动，高低不稳定。所以要有调速器来随时改变水轮机的输入流量来调节输出功率，以维持一定的转速。

人们常把水轮机的转速稳定在一定的区域范围之内。这个区域就是调速器所要调节控制的范围。

机组转速的上升和下降可以从它的速度和它的加速度方面测量得出。因此调速器首先要测得这种转速和它的变化，即与额定转速比较后得出是上升还是下降的信号来调节。更进一步还可加入水轮机转速变化的速度和加速度两种信号来加快调节，改善调节质量。

把实际测得的转速和一个标准量相比较就可得出转速是上升还是下降的结果，例如通过一组机械飞摆来反应转速的变化或是用一组电气元件来测量测速发电机频率的变化。调速器的主要作用原理见图79。

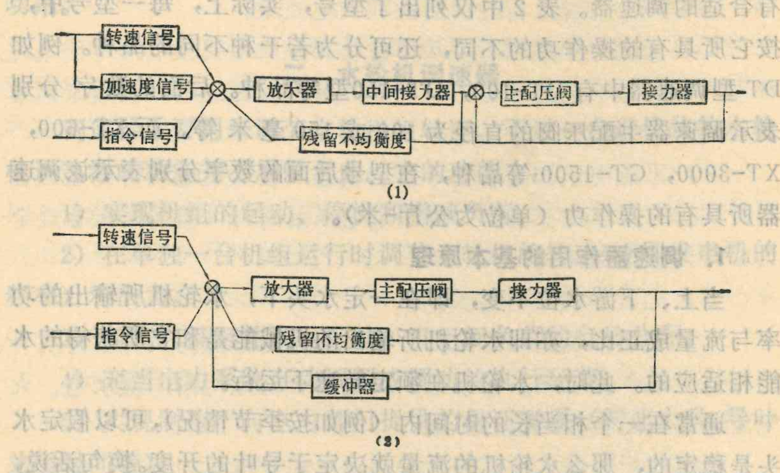


图79 调速器作用原理方框图

这种转速变化的差异是很小的，所以测得的量要先进行放大（图上的放大器）。有的只需一级放大，有的需二级放大不等。图79（1）中的中间接力器实际上就是一个液压放大环节。接着通过主配压阀和接力器的作用使功率加大，能推动变更导叶的开度。如果转速升高了，那么就把导叶关小些。如果是转速减低了，就把导叶开大些。随着导叶开度的变化，调节水轮机的流量，使水轮机的功率能与系统的要求相适应。但矛盾并没有完全解决，由于负荷的变化是不间断的，调整的动作也就是不停息的；其次是调整不会那么恰到好处，会由于调整系统中的惯性而过量调整，或因调整系统的迟缓，不灵敏而使调整不足。这样就需要把调整后的后果随时反应回来，再进行比较误差，补偿，这就叫反馈。在调速器中，如图79中（1）所示的残留不均衡度机构，或是（2）

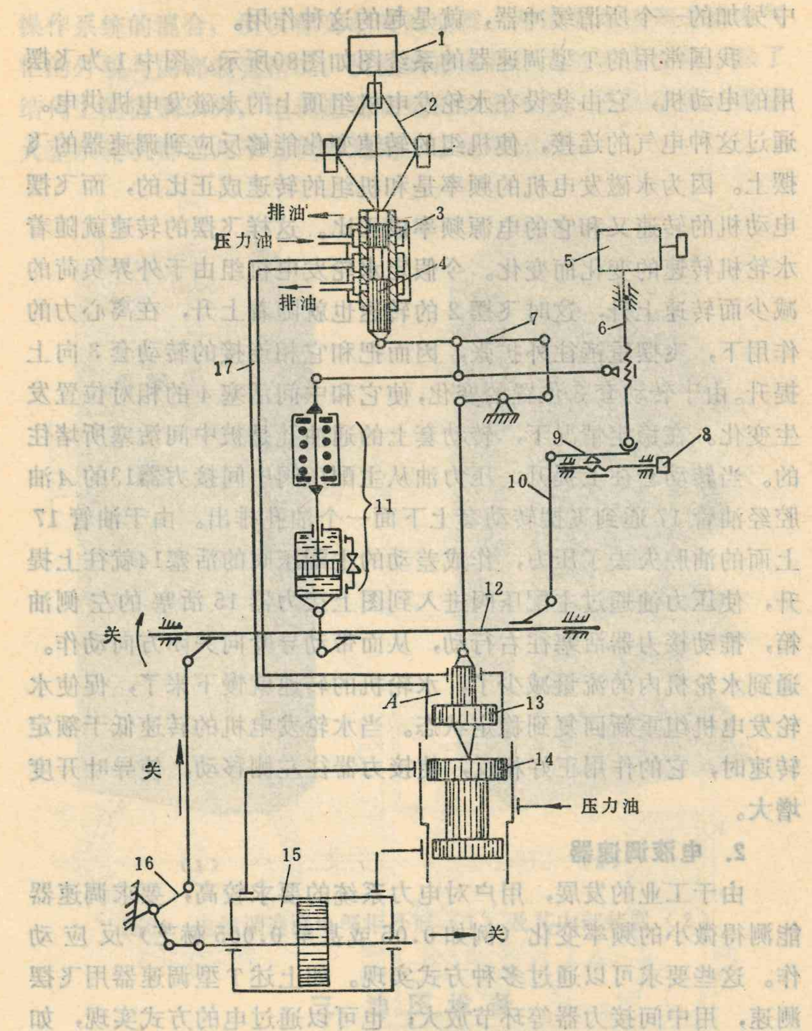


图80 T型调速器系统图

1—飞摆电动机；2—飞摆；3—转动套；4—活塞；5—转速调整机构电动机；6—转速调整机构；7—杠杆；8—残留不均衡度调整机构；9、10—杠杆；11—缓冲器；12—回复杆；13—中间接力器；14—主配压阀；15—接力器；16—回复杠杆；17—油管

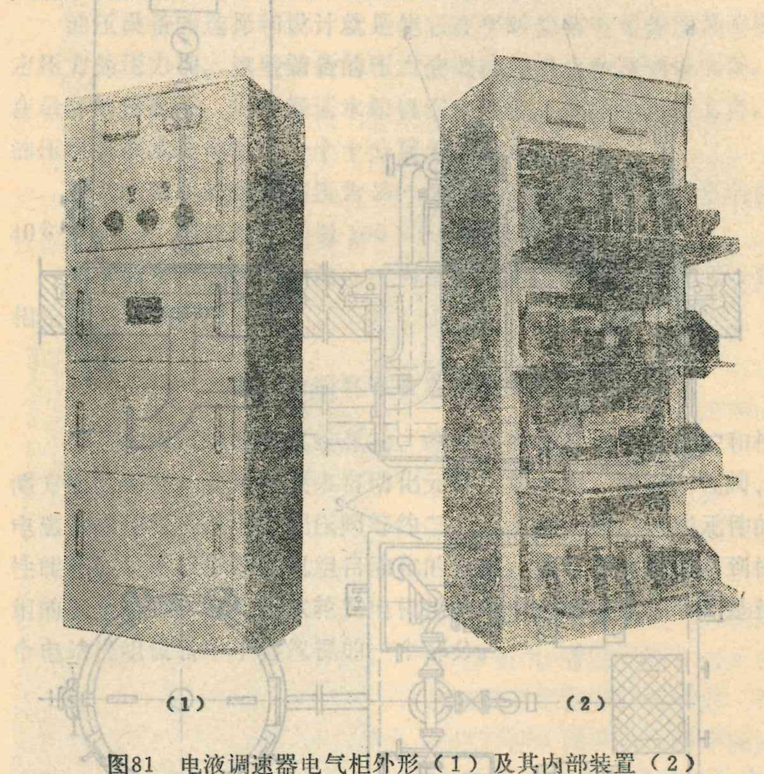
中另加的一个所谓缓冲器，就是起的这种作用。

我国常用的T型调速器的系统图如图80所示。图中1为飞摆用的电动机，它由装设在水轮发电机组顶上的永磁发电机供电。通过这种电气的连接，使机组的转速变化能够反应到调速器的飞摆上。因为永磁发电机的频率是和机组的转速成正比的，而飞摆电动机的转速又和它的电源频率成正比。这样飞摆的转速就随着水轮机转速的变化而变化。今假定水轮发电机组由于外界负荷的减少而转速上升，这时飞摆2的转速也就随着上升，在离心力的作用下，飞摆重锤往外扩张，因而把和它相连接的转动套3向上提升。由于转动套3位置的变化，使它和中间活塞4的相对位置发生变化。在稳定情况下，转动套上的通油孔是被中间活塞所堵住的。当转动套往上提升，压力油从主配压阀中间接力器13的A油腔经油管17通到飞摆转动套上下面一个油孔排出。由于油管17上面的油腔失去了压力，作成差动的主配压阀的活塞14就往上提升，使压力油通过主配压阀进入到图上接力器15活塞的左侧油箱，推动接力器活塞往右行动，从而带动导叶向关闭方向动作。通到水轮机内的流量减少了，水轮机的转速就慢下来了，促使水轮发电机组重新回复到稳定状态。当水轮发电机的转速低于额定转速时，它的作用正好相反，使接力器往左侧移动，使导叶开度增大。

2. 电液调速器

由于工业的发展，用户对电力系统的要求较高，要求调速器能测得微小的频率变化（例如0.05或甚至0.005赫芝）反应动作。这些要求可以通过多种方式实现。如上述T型调速器用飞摆测速，用中间接力器等环节放大；也可以通过电的方式实现，如采用对频率敏感的测频元件和放大器（电子管、磁放大器或晶体管等）。前一种称为机械液压调速器，后一种称为电液调速器。电液调速器简称电调速器。它的测量、放大以及反馈等虽可用电的方法实现，而后面各部分的操作则仍用油压，因而它是电和液压

操作系统的混合，所以称为电液调速器。图81为电液调速器电气柜的外貌与内部装置情况。机械调速器与电调速器相比较，除了结构上的区别以外，电调速器在运行方面有更大的优越性。近来大型水轮机都已几乎无例外地用上了电调速器。



（1）　（2）

图81　电液调速器电气相外形（1）及其内部装置（2）

三、油压设备

按水轮机大小的不同，用来操作导叶以调节流量所需的功，从数百到几万公斤-米不等。从操作的要求来看：一是操作所需的功大；二是操作的速度快；三是要确保安全。按通常情况，水电站都是无例外地采用油压操作。因为水电站是产生电力的，当水

图82 油压设备布置图

1—压力油箱；2—回油箱；3—油泵；4—油泵电动机；
5—油面信号器

电站发生故障时，往往也联系到电力系统的故障，这时就会失去电源，所以电力操作不如油压操作有保证。

油压设备的主要组成是两台油泵、一个压力油罐、回油箱及其附件。图82为油压设备的布置图。

油压设备的选择和设计就是使它在平时储蓄有足量的具有额定压力的压力油。这些储备的压力油要使得机组在遇到事故后，在最坏的情况下，仍能保证水轮机安全停机。从这个意义上讲，油压设备确实是电站中一个十分重要的装置。

通常水轮机的操作油压为20～25公斤/厘米^2，正在设计中的有40公斤/厘米^2。国外已有采用100公斤/厘米^{2}的油压。

油压设备上有两台油泵，一为主用，一为备用，平时可以互相轮换使用以确保安全。

四、水轮发电机自动化元件

为了实现水轮发电机组起动、停机等操作过程以及保护和检测方面的需要，要用到很多自动化元件，如水阀、油阀、气阀、电磁铁操作机构及电磁配压阀等约二、三十种元件。这些元件的性能和质量不仅影响到机组自动化的程度，而且还直接关系到机组的安全运行。它们是水轮发电机组的一个有机组成环节，是整个电站机组设备中不容忽视的一个部分。

第五章　励磁及励磁调节装置

一、励磁及励磁调节装置的作用原理

在讲述发电机原理的时候知道，由于转子磁场转动所产生的旋转磁场，切割了定子导线而产生了交流电势。所以在发电机转子绕组内必须引入一个直流电源用以产生磁场。这个直流电源通常称为励磁（或激磁）电源，它由直流励磁机或由交流电源通过整流变成直流后供给。前面图7中自上而下，紧接着转速继电器、永磁发电机之下的便是励磁机。

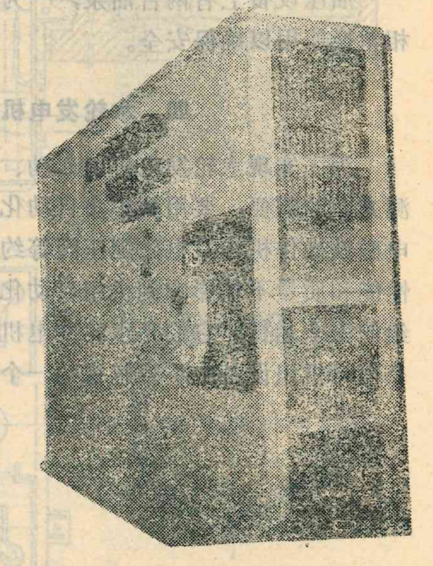
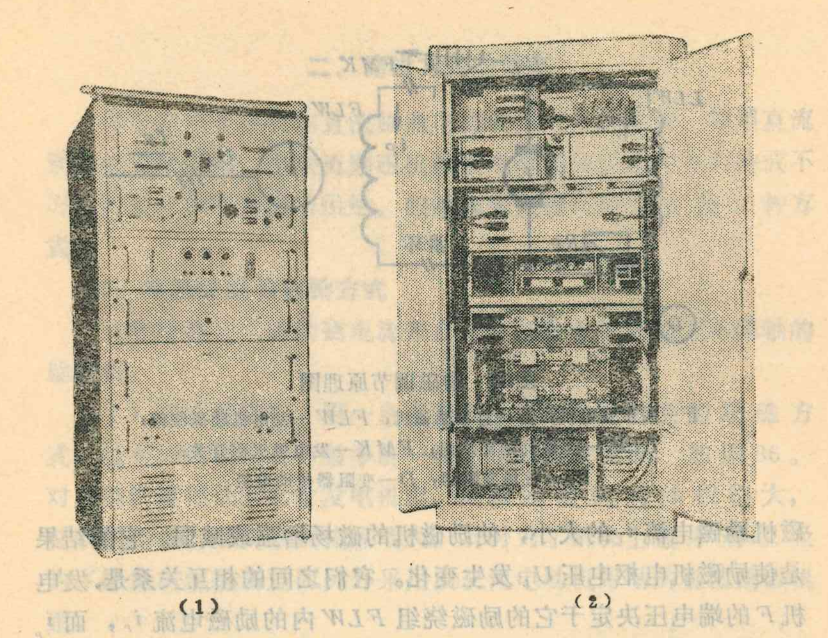


图83　水轮发电机电磁式励磁调节控制设备

当电力系统负荷发生变化时，要求励磁机电源也随之作相应的变化，使水轮发电机的电压和无功功率能与外界负荷相适应。因此在励磁回路中还必须设有调节装置以进行调节。这种调节装置便是所谓励磁调节器。调节的方法可以手动，也可以自动。不过在事故时，进行手动调节，是不能满足运行要求的。何况从现代化电力系统的供电质量要求来看，亦要求装设自动化设备，以提高运行的可靠性。图83是常用电磁式励磁调节控制设备，图84是KGT-9型励磁装置的正面和内部装置。



（1）　（2）

图84　KGT-9型励磁调节器的正面（1）和它的内部装置（2）

励磁回路中除励磁调节设备之外，还设有灭磁开关，用以保护发电机并在故障时迅速切断励磁电源并灭磁。

至于励磁机，实际上就是一台直流发电机，这里不详述了。

最简单的一种励磁及其调节装置的原理如图85。

图中F表示同步发电机（它可以是水轮发电机或汽轮发电机），FLW为发电机的励磁绕组。它的励磁电流i_F由励磁机L供给。改变励磁就会改变发电机端电压或补偿由于发电机负载电流I_F和功率因数变化（即发电机有功功率和无功功率之间分配关系的变化）所引起的发电机端电压的变化。发电机的励磁绕组通过滑环与励磁机相连接。

FMK是一个灭磁开关。它的作用是快速切断励磁电源。L是一个直流发电机（励磁机），而LLW又是它的励磁绕组。R_F是磁场变阻器。调节R_F（即改变R_F电阻的大小），就会改变励

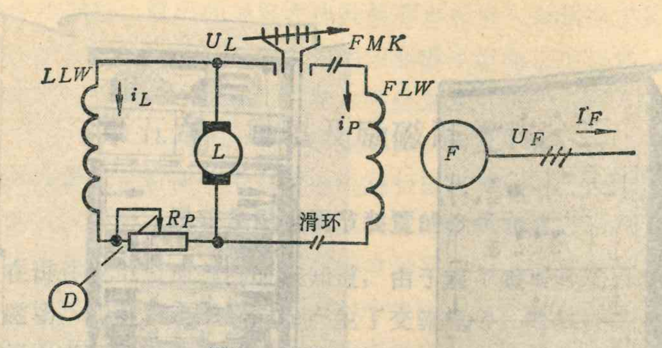


图85 励磁调节原理图

F—同步发电机；L—直流励磁机；FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；FMK—发电机灭磁开关；R_P—磁场变阻器；D—变阻器传动电机

磁机励磁电流 i_L 的大小，使励磁机的磁场增强或减弱。它的结果是使励磁机电枢电压 U_L 发生变化。它们之间的相互关系是，发电机 F 的端电压决定于它的励磁绕组 FLW 内的励磁电流 i_P，而 i_P 决定于励磁机 L 的端电压 U_L。这个 U_L 的大小又由励磁机 L 的励磁电流 i_L 来决定。因此调节磁场变阻器 R_P 的电阻值会改变 i_L 的大小。改变 R_P 的电阻值又会改变发电机 F 的端电压 U_F。

R_P 可以手动、电动或通过适当自动化方式控制。例如图中 D 是一个电动机，通过这个电动机可使 R_P 增加或减少。要是电动机 D 与一自动装置连接起来，那么它就能遵照自动装置的要求增、减励磁。像这样的自动调节装置便是自动的励磁调节器。

采用了自动调节装置后，除了使发电机在正常情况下自动调节所需的励磁外，还可以提高发电机在电力系统中并联运行时的可靠性和稳定性。

这就是励磁系统和励磁调节装置的基本原理。应当指出，励磁系统包括励磁电源和调节装置两大部分。所以其调节效果不仅与调节装置的质量有关，还涉及励磁机的特性，应综合起来衡量。

二、励磁方式的种类

可供水轮发电机作直流励磁电源的方式是很多的，如用直流励磁机直接供给，由交流励磁机或发电机端变压器经可控的或不可控的整流器❶整流后供给。归纳起来大致可分为下面三种方式。

1. 用励磁机的它励方式

这种励磁方式的励磁电源来自其它与发电机同轴或不同轴的励磁机。

1）直流励磁机　用一台直流发电机作为励磁机的励磁方式。这是国内目前运行最多的一种，励磁方式简单，如图86。对某些转速很低的水轮发电机组，同轴励磁机的体积很大，材料用得多，时间常数相应增大。有时为了解决上述矛盾以及为了降低机组的高度而另外采用由交流电动机带动的直流励磁机组。

2）交流励磁机　随着半导体整流技术的发展，采用交流励磁机经可控或不可控整流器整流后，供给同步发电机所需直流励磁电源的方式已逐渐增多。与直流励磁机相比，有色金属消耗较少，维护方便，运行可靠。因为水轮发电机的转速较低，可以采用单独的交流发电机或其它方式供电来励磁。图86、87中采用的是不可控硅整流，供给水轮发电机转子的绕组。励磁调节是通过调节交流励磁机来实现的。硅整流器的布置可以是静止的，也可以是与主轴一起旋转的。当布置在轴上时因取消了滑环和电刷，故也称无刷励磁。但水轮发电机一般较少采用这两种方式。贯流式水轮发电机组有时为了结构布置、维护的方便，往往优先考虑选用无刷励磁方式。

图88采用的是可控硅整流器，它除了将交流励磁机的交流

❶ 如硅整流器有可控的或不可控的硅整流器，后者在本书图上称为硅整流器。

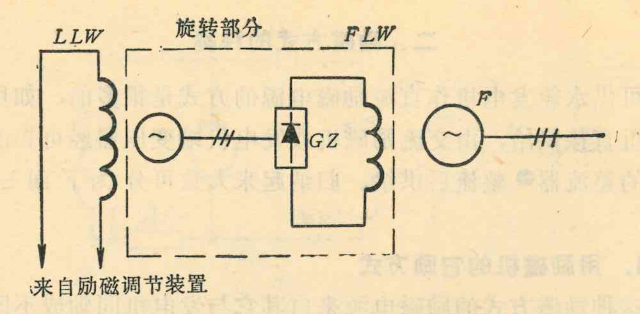


图86 旋转半导体励磁（无刷励磁）

F—同步发电机；*FLW*—发电机励磁绕组；*JL*—交流励磁机；
LLW—励磁机励磁绕组；*GZ*—硅整流器

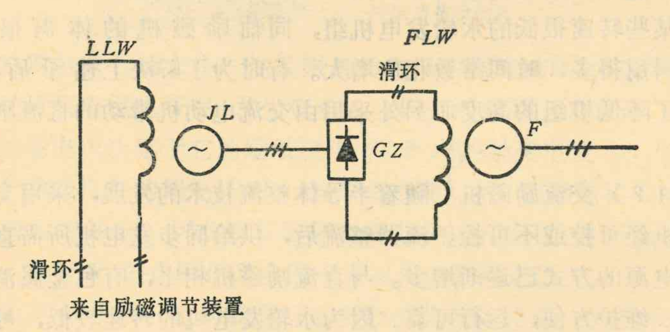


图87 它励静止半导体励磁

F—同步发电机；*FLW*—发电机励磁绕组；*JL*—交流励磁机；
LLW—励磁机励磁绕组；*GZ*—硅整流器

电源变换成直流外，还受调节装置控制，可改变直流励磁电源的大小。现代的调节装置动作快速，而可控硅的开闭时间也极短，所以用这种励磁方式后，在调节过程中发电机励磁电压的改变几乎是无延时的。励磁电压的顶值倍数（最高倍数）也可设计得较高。另外当发电机故障时，使可控硅整流器工作在逆变状态（所谓逆变就是它的正常工件状态倒了过来），可将发电机转子的直流磁场能量迅速地送回给交流励磁机。这样会使发电机灭磁从而代

替了灭磁开关的作用。这种方式也称为它励可控硅励磁（见图88）。

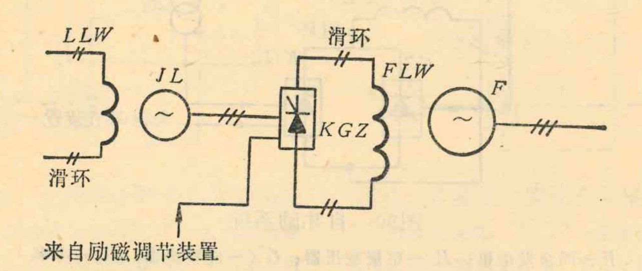


图88 它励可控硅励磁

F—同步发电机；*FLW*—发电机励磁绕组；*JL*—交流励磁机；
LLW—励磁机励磁绕组；*KGZ*—可控硅整流器

2. 由主发电机经变压器供电的静止自励方式

在这类方式中，发电机的励磁电源不是由励磁机供给，而是取自主发电机端的变压器。经可控或不可控整流器整流后再送给发电机转子绕组，取消了旋转的励磁机，故称为静止自励方式。它没有噪音。因为没有励磁机，机组的高度也减低，但设备占用的面积较大。采用电磁性元件的静止自动系统在大容量机组上已很少。图88至图90所示是采用可控硅整流器的静止自励系统的几种接线原理图。这类方式的励磁调节速度快，发电机励磁电压的变化几乎是没有延时的。但由于励磁电源引自发电机端，所以发电机运行工况的改变及电力系统事故时，对励磁电源会有影响。在设计这类励磁系统时，应把这些因素考虑在内。

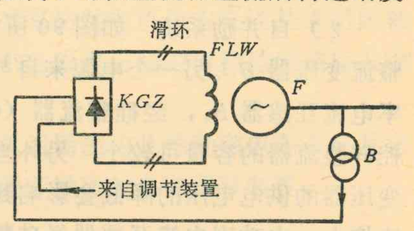


图89 简单自励系统

F—同步发电机；*B*—整流变压器；
FLW—发电机励磁绕组；
KGZ—可控硅整流器

1）简单自励系统　如图88所示，可控硅整流器（*KGZ*）由

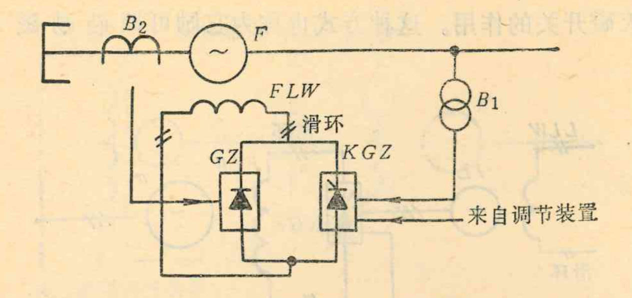


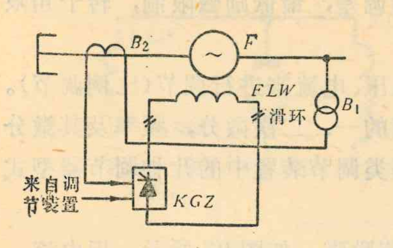
图90　自并励系统

F—同步发电机；B_1—整流变压器；GZ—硅整流器；B_2—功率电流互感器；KGZ—可控硅整流器

接在主发电机端的整流变压器供电，转换成直流。用调节装置控制这个电流以改变励磁的大小。这个系统线路简单，但当发电机附近短路时，整流变压器的供电电压大大降低，励磁电源减小，甚至消失。所以设计时应适当提高正常工作情况下的整流变压器二次电压。目前在一些容量较小、要求不很高的机组上应用。

2）自并励系统　如图 90 所示，发电机励磁的一个电源来自整流变压器 B_1。另一个电源来自与发电机负荷电流成正比例的功率电流互感器 B_2，经硅整流器（GZ）整流后共同供给。这样可控硅整流器的容量可较小，另外当发电机附近短路时，虽然整流变压器的供电电压的降低会影响到励磁电源，但由于这时短路电流增大，由功率电流互感器经硅整流器供给的那部分励磁电源，随短路电流正比例加大，从而保证所需的励磁电源。如果功率电流互感器参数选择合适，这时励磁电源不但不减少，还可提供一定的强励能力。

3）自复励系统　在这种励磁系统中，变压器 B_1、互感器 B_2或是在交流侧先串联后再经可控硅整流器整流，如图92所示，或是分别由功率电流互感器B_2经不可控整流器整流和整流变压器B_1经可控硅整流器整流，在直流侧相串联后供给发电机转子绕组如图 91 所示。后者对可控硅整流装置电压水平的要求可降低。



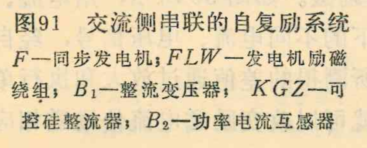


图91　交流侧串联的自复励系统

F—同步发电机；FLW—发电机励磁绕组；B_1—整流变压器；KGZ—可控硅整流器；B_2—功率电流互感器

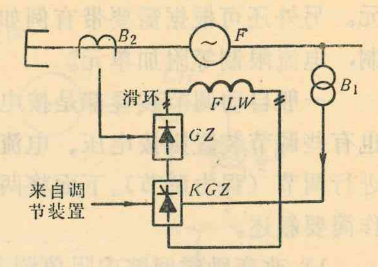


图92　直流侧串联的自复励系统

F—同步发电机；FLW—发电机励磁绕组；B_1—整流变压器；GZ—硅整流器；B_2—功率电流互感器；KGZ—可控硅整流器

本系统能直接反应负荷功率因数的改变，具有相复励作用。同时它对各种不对称短路仍有较好的对称性，提高了自励系统的工作独立性。

上述各种励磁方式，近几年来已在不同类型的汽轮发电机和水轮发电机上应用。不过对大型水轮发电机组主要还是采用同轴直流励磁机，或由交流励磁机供电采用它励的可控硅励磁以及静止的自励系统三种方式。

以上讲的是供给水轮发电机组励磁的几种励磁电源系统及它们的作用原理。下面介绍用来调节励磁的自动调节装置。

三、励磁自动调节装置的型式

励磁自动调节装置的种类很多。按工作情况或是改变励磁回路中的参数如改变磁场回路中的阻值（可控硅整流器的导通程度改变也可等效的看作回路参数的改变），或是引入一个由自动调节装置送来的附加励磁去增大和减小原磁场的强弱，实现励磁的自动调节。所以大致可按此分为两类。

自动调节装置概括的说主要包括：测量（参考、比较、给定），放大（一至三级），稳压及移相触发，执行（功率元件），反馈等单

元。另外还可根据需要带有例如调差，最低励磁限制，转子角限制，电流限制等附加单元。

一般自动调节装置都是按电压、电流来进行调节(比例调节)。也有些调节装置则按电压、电流的一、二次微分，频率及其微分进行调节（强力调节)。下面将两类调节装置中的几种调节器型式作简要叙述。

1）改变励磁回路中阻值调节励磁。如图 93 所示，用电流、电压互感器测得发电机运行状况下的不同电流、电压信号，经自动调节装置检测出偏差，然后把所测得的差值通过放大和执行单元来改变磁场调整电阻值。这样就可以改变励磁电流使励磁相应变化。过去常见的炭阻式调节器、振动式调节器等，都属这一类。因这类调节器动作慢，不够灵敏，目前已渐少采用。

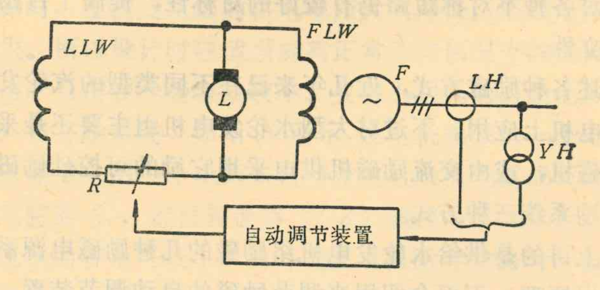


图 93

FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；F—同步发电机；LH—电流互感器；L—直流励磁机；R—磁场调整电阻；YH—电压互感器

利用可控硅整流器串接在励磁机励磁回路中或并联在磁场变阻器上，使其间歇开、关，使得励磁回路起到等效的阻值变化，进行励磁调节。这种调节装置也称可控硅直流开关式自动励磁调节器，如图 94 所示。这种调节器对可控硅整流器的控制办法有所谓“定频调宽”和“定宽调频”两种。前者是使可控硅整流器的开关频率——每秒开关的次数固定，而导通的时间长短是可调整

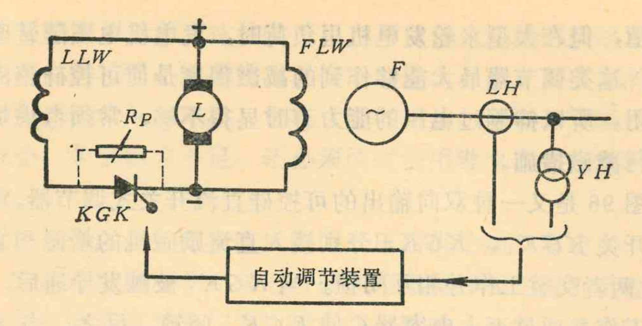


图 94

F—同步发电机；L—直流励磁机；R_P—磁场变阻器；KGK—可控硅直流开关；FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；LH—电流互感器；YH—电压互感器

的。开时，励磁回路阻值最小，开的时间长则励磁增加。后一种办法是使可控硅整流器导通的时间长短固定，而每秒钟开关的次数——开关频率是可调整的，频率增加则励磁增加。利用这两种控制方法的调节器在我国都已投入运行。图95是这种调节器在交流励磁机上使用时的原理图。

在这类励磁自动调节装置中，电流、电压互感器仅作反映发电机工况的信号用。调节器不需要其它功率电源，并可自动强励

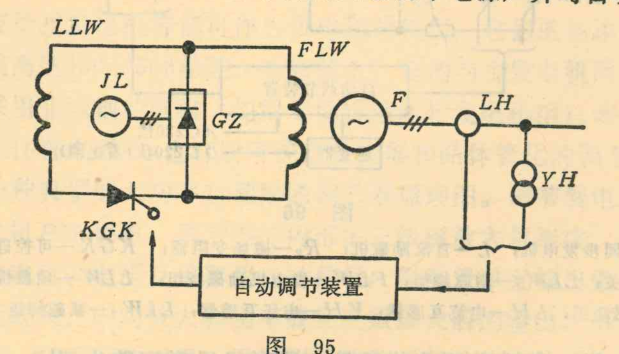


图 95

F—同步发电机；JL—交流励磁机；GZ—硅整流器；KGK—可控硅直流开关；FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；LH—电流互感器；YH—电压互感器

到顶值，但在大型水轮发电机甩负荷时，发电机电压随转速同时升高，这类调节器最大能够作到的减磁程度是使可控硅整流器全部关闭。所以抑制过电压的能力有时显得不够，常须考虑加装其它强行减磁措施。

图 96 是又一种双向输出的可控硅直流开关式调节器。可控硅直流开关 KGK_1，KGK_2 分别接入直流励磁机的增磁和减磁绕组上，两者交替工作并相互闭锁。当 KGK_1 被触发导通后，增磁绕组工作并通过灭火电容器 C 使 KGK_2 闭锁。反之，当 KGK_2 被触发导通时，减磁绕组工作并使 KGK_1 闭锁。所以只要控制其中一个导通时间的长短，即可使增磁、减磁绕组的工作变化，达到励磁增加或减少的目的。例如当发电机甩负荷时电压上升，这时使 KGK_2 导通大大提高，增磁绕组立即被闭锁停止工作，只有减磁绕组工作，由于此极性是反向的起到了去磁作用，使发电机的电压上升受到限制。

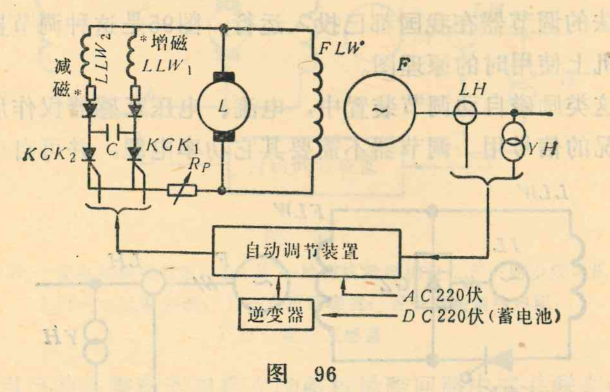


图 96

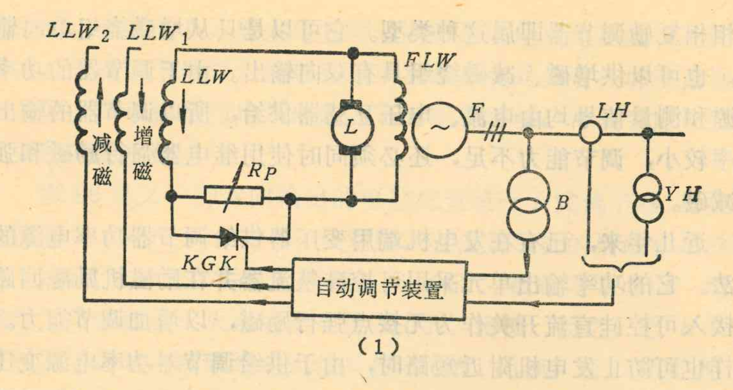
F—同步发电机；L—直流励磁机；R_P—磁场变阻器；KGK—可控硅直流开关；LLW_1—增磁绕组；FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；LH—电流互感器；YH—电压互感器；LLW_2—减磁绕组

2）另一种励磁调节装置是在励磁机励磁回路中引入一个由自动励磁调节装置送来的附加励磁使励磁改变的办法，目前用得较多的 F-D 系列（即复式励磁和电磁式电压校正器）以及单相、三相相复励调节器即属这种类型。它可以是只从增磁绕组单向输出，也可以供增磁、减磁绕组具有双向输出。由于调节器的功率电源和测量信号均由电流、电压互感器供给，所以调节器的输出功率较小，调节能力不足，还必须同时使用继电器强行励磁和强行减磁。

近几年来，已有在发电机端用变压器供给调节器功率电源的方法。它的功率输出单元采用可控硅整流器并在励磁机励磁回路中接入可控硅直流开关作为无接点强行励磁，以增加调节能力。这样也可防止发电机附近短路时，由于供给调节器功率电源变压器 B 的电压大大降低而引起调节器输出减少之不足，并可自动强励到顶值。同时减磁绕组在一定程度上可抑制发电机因甩负荷而引起的电压上升过高。磁场变阻器也是作为自动调节装置的备用而设置的。如图 97 KGK 可控硅直流开关在正常时是关闭的，励磁机励磁绕组 LLW 由自动调节装置供电，并进行调节。这时励磁机 L 是它励工作。当发电机附近短路时，变压器 B 的二次电压大大降低，这时 KGK 导通励磁机强行励磁。

通常这种大功率输出进行快速连续调节的自动励磁调节器，一般是由单独的调节器电源机组供电。同步发电机、永磁发电机和感应子式发电机等都可作为供电用的机组。它们的频率有用50赫芝或高达400～500赫芝。在布置上，有的与主发电机同轴，有的则采用非同轴的机组（如用于低转速水轮发电机组）。调节器的功率元件有电磁的，也有用可控硅整流器和晶体管化的调节器。图98是一种典型的大功率自动励磁调节器原理图。调节器电源由永磁发电机 PM 供电，调节器的内部由三级磁放大器组成。

由电流、电压互感器测得的信号，经测量单元检出偏差，通过前置放大、中间放大和功率放大三级放大后的输出，引至励磁机增磁、减磁附加绕组，根据测得的信号偏差使它的输出发生变化，从而增强或减弱励磁机的磁场实现励磁调节。它的调节范围较大。图 98 中功率放大元件也可采用可控硅整流器，类似的调节



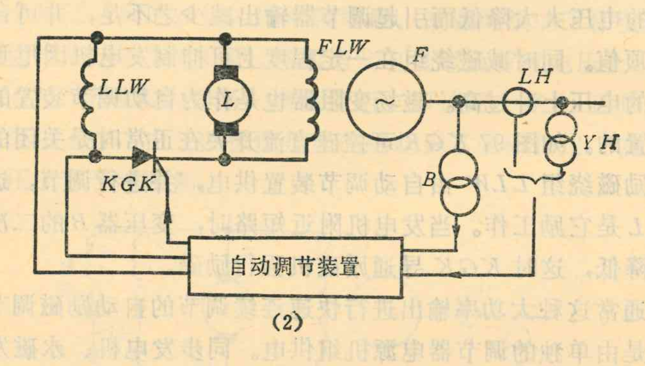


图 97

F—同步发电机；L—直流励磁机；R_p—磁场变阻器；FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；LLW_1—增磁绕组；LLW_2—减磁绕组；B—调节器供电变压器；LH—电流互感器；YH—电压互感器

器已在50000千瓦水轮发电机上投入运行。该调节器的电源机组为500赫芝的感应子式发电机组。

图99、100是另外两种采用可控硅整流器作调节器功率单元的原理图，已在大型水轮发电机组上应用。调节器的功率单元采用三相桥式可控硅整流器全控线路。除了正常时控制可控硅整流器导通角进行调节并连续强励到顶值外，在电力系统发生事故，或机组甩负荷时，能有效地抑制发电机过电压以及机组故障，可

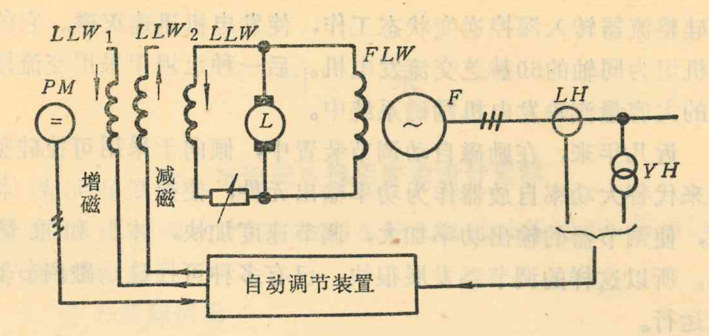


图 98

F—同步发电机；L—直流励磁机；PM—永磁发电机；FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；LLW_1—增磁绕组；LLW_2—减磁绕组；LH—电流互感器；YH—电压互感器

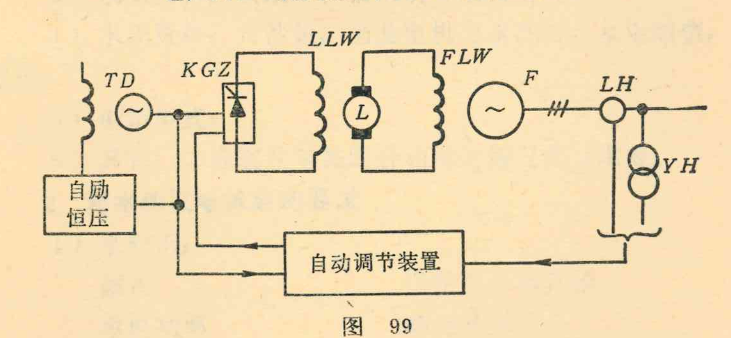


图 99

F—同步发电机；L—直流励磁机；KGZ—可控硅整流器；TD—调节器电源机组；FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；LH—电流互感器；YH—电压互感器

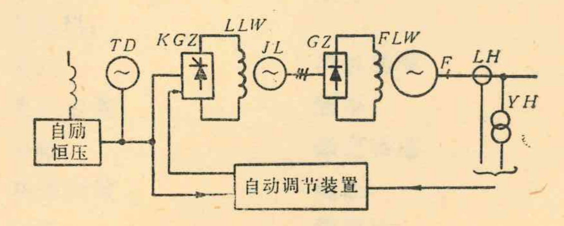


图 100

F—同步发电机；JL—交流励磁机；GZ—硅整流器；KGZ—可控硅整流器；TD—调节器电源机组；FLW—发电机励磁绕组；LLW—励磁机励磁绕组；LH—电流互感器；YH—电压互感器

控硅整流器转入深控逆变状态工作，使发电机迅速灭磁。它的电源机组为同轴的50赫芝交流发电机。后一种已用于采用交流励磁机的大容量汽轮发电机励磁系统中。

近几年来，在励磁自动调节装置中，倾向于采用可控硅整流器来代替大功率自放器作为功率输出元件，使控制单元晶体管化，使调节器的输出功率加大，调节速度加快，体积和重量减小。所以这样的调节器发展很快，已有多种可控硅励磁调节器投入运行。

附　　录

一、水轮发电机组原始设计资料

通常水电站的设计部门应向水轮发电机设备制造厂提出以下各方面资料。

1. 水力资源情况

1）水头：最高、最低和设计水头；

2）流量：最大和设计流量；

3）水文资料：洪水期、枯水期等水文情况；

4）水质资料：含沙量，当发电机为水冷时，水电阻值，水温值；

5）电站型式；

6）其它：如地震及有关综合利用的情况和要求等。

2. 对水轮发电机组的要求

1）水轮机：

型式	转轮型号和直径
单机功率	额定转速
飞逸转速	轴承润滑方式
安装高程[1]	旋转方向

2）发电机：

型式	单机功率
装机台数	频率
极数	额定转速
功率因数	电压
电流	短路比
转动惯量	瞬变及超瞬变电抗

[1] 机组安装的海拔标高

冷却方式　　　　　　绝缘等级
旋转方向　　　　　　冷却方式

3）励磁机、励磁系统及控制方式；

4）调速器及油压设备型式；

5）对机组自动化的要求；

6）机组前压力水管上进水阀门的型式、直径及其控制设备（在装有进水阀门的情况下，有时不用）；

7）空放阀的型式、直径及控制方式（在装有空放阀的情况下，有时不用）。

3、水电站厂用动力源情况

1）电站厂用（包括主用及备用）交、直流电源情况；

2）压缩空气系统（包括高压及低压）压力、风量等情况；

3）油系统压力、油量等情况；

4）供水系统（包括主用及备用水源）压力、流量等情况。

4. 水电站要求制造厂保证事项

1）机组甩全负荷时，压力水管内的压力上升许可值；

2）机组甩全负荷时，转速上升许可值及飞逸转速值；

3）机组甩全负荷时，水轮机导叶从全开到全关的关闭时间。

4）机组的功率；

5）机组在各种工况（不同水头，不同负荷）的效率；

6）汽蚀情况；

7）其它由国家标准或制造厂技术条件所规定的事项如振动、摆度等。

其中1）、2）、3）项一般合称为调节保证事项。

5. 水电站所在电力系统的情况及运行方式

如承担基荷、峰荷以及要否作调相运行●等。

● 调相运行是将水轮机的水源切断（关闭机组前的阀门及水轮机导叶），使发电机从电网吸取电力，改作为电动机运行。这时水轮机空转。它的作用是改善电力系统的功率因数。

二、水轮机型号

我国生产的各型水轮机牌号由三部分组成，各部分之间用短横分开。

第一部分，由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成。拼音字母表示水轮机型式，各类水轮机的拼音字母代号见表1；数字表示转轮型号，转轮型号一律采用统一规定的比转速代号。

表1　各类水轮机代号

水轮机型式		代号
冲击型	水斗式	QJ
	斜击式	XJ
	双击式	SJ
反击型	混流式	HL
	斜流式	XL
	轴流转桨式	ZZ
	轴流定桨式	ZD
	贯流转桨式	GZ
	贯流定桨式	GD

第二部分，由两个汉语拼音字母组成。前一字母表示水轮机主轴布置型式，后一字母表示水轮机引水室特征（见表2）。

表2　水轮机主轴布置及引水室特征代号

主轴布置型式	代号	引水室特征	代号
立轴	L	金属蜗壳	J
		混凝土蜗壳	H
		明槽	M
		灯泡式	P
卧轴	W	罐式	G
		竖井式	S
		虹吸式	X
		轴伸式	Z

第三部分，表示水轮机转轮标称直径 D_1，单位为厘米。水斗式水轮机表示的内容较多，第三部分规定记为：

$$\frac{\text{水轮机标称直径(单位厘米)}}{\text{作用在每一转轮上的喷嘴数目}\times\text{设计射流直径(单位厘米)}}$$

牌号示例：

HL220-LJ-550

表示混流式水轮机，转轮型号220，立轴，金属蜗壳，转轮直径为550厘米。

ZZ560-LH-800

表示轴流转桨式水轮机，转轮型号为560，立轴，混凝土蜗壳，转轮直径为800厘米。

$$2QJ\times\times\times-W-\frac{120}{2\times10}$$

表示一根轴上有二个转轮的水斗式水轮机，转轮型号为×××，卧轴，转轮直径为120厘米，每个转轮上有二个喷嘴，设计射流直径为10厘米。

只限国内发行
统一书号：15033·(内)663
定　价：0.32　元